

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra sklářských strojů a robotiky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zařízení pro bezkontaktní měření tloušťky skla

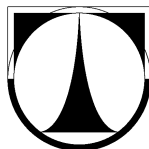
(The equipment for non-contact measurement of glass thickness)

Lukáš KOUTNÍK
2009

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M 2301 - Strojní inženýrství



Studijní obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Sklářské a keramické stroje

Zařízení pro bezdotykové měření tloušťky skla

(The equipment for non-contact measurement of glass thickness)

KSR – 19452

Lukáš KOUTNÍK

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. František Novotný, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Marcel Horák, Ph.D.

Rozsah diplomové práce:

Počet stran:	59
Počet tabulek:	4
Počet obrázků:	48
Počet výkresů:	3
Počet příloh:	0
Počet modelů:	0

Datum odevzdání: 5. 6. 2009

ZADANI

DIPLOMOVÁ PRÁCE

TÉMA: Zařízení pro bezkontaktní měření tloušťky skla

ANOTACE:

Práce se zabývá problematikou bezkontaktního měření tloušťky skla. Řešena byla možnost využití různých druhů snímačů vhodných k bezkontaktnímu měření tloušťky transparentních materiálů včetně laboratorních testů. Hlavní část práce se zabývá návrhem a konstrukčním řešením variant měřicí stanice pro přípravné linky na výrobu autoskel. Na základě technických a dispozičních možností linky pak byla zvolena a podrobně zpracována vybraná varianta.

KLÍČOVÁ SLOVA: bezkontaktní senzorika, laser-optické senzory, konfokální senzory, triangulace, bezkontaktní měření vzdálenosti, lineární aktuátor, lineární vedení

THEME: The equipment for non-contact measurement of glass thickness

SUMMARY:

This thesis deals with problemation of non-contact measurement of glass thickness. It has been solved the usage of some specific kind of sensors, including laboratory tests. Main part of work is about designing of equipment alternative construction. On the base of technical conditions has been choosen propriet construction alternative.

KEY WORDS: non-contact measurement, laser sensors, confocal sensors, triangulation, linear actuator, linear guide

P r o h l á š e n í

Byl (a) jsem seznámen (a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.)

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 6.5. 2009

Podpis:

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Františku Novotnému, CSc., za neocenitelné rady, náměty, odborné vedení a správné směřování při vypracovávání této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Marcelu Horákovi, PhD. za cenné rady a vstřícný přístup.

Poděkování si zaslouží též Ing. Milan Maxim z oddělení engineeringu AGC Automotive Czech, a. s., za poskytnutí užitečných informací a cenných rad.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	9
ÚVOD	10
1. Rozbor současného stavu:	11
1.1. Stanovení technických podmínek pro zabudování zařízení do výrobní linky	11
1.1.1. Linka Bystronic 1	12
1.1.2. Linka Bystronic 2	14
1.1.2.1. Rameno č. 1	14
1.1.2.2. Rameno č. 2	17
1.1.3. Linka Bystronic 3,4	18
1.1.4. Linka Bystronic 5	21
1.2. Shrnutí	22
2. Metody měření tloušťky transparentních materiálů	23
2.1. Laser-optické senzory	23
2.2. Konfokální senzory	25
2.3. Multi-ABLE systém	27
2.4. Laboratorní testy snímačů	27
2.5. Shrnutí laboratorních testů	33
3. Alternativy řešení měřicího zařízení	34
3.1. Rám	34
3.1.1. Svařenec	34
3.1.2. Duralový rám	34
3.1.3. Kombinovaný rám	35
3.1.4. Porovnání tuhostí rámu	35
3.1.5. Ukotvení rámu	36
3.2. Lineární vedení	37
3.2.1. Pohon lineárního vedení	38
3.2.2. Odměřování	39
3.3. Lineární aktuátor	40
3.3.1. FESTO	40
3.3.2. SMC	41
3.4. Senzory	43
3.4.1. SICK, triangulační	43

3.4.2.	KEYENCE, triangulační	44
3.4.3.	Micro-Epsilon, konfokální	45
3.4.4.	Kalibrace	46
4.	Výběr a konstrukční popis	47
4.1.	Výběr prvků	47
4.2.	Popis konstrukce a výpočty	48
4.3.	Přehled výkresové dokumentace	56
5.	Zhodnocení navrženého řešení	57
	Závěr	58
	Seznam použité literatury	59

Seznam použitých symbolů a značek

P_r	[N]	Radiální zatěžující síla
C_{0rad}	[N]	Únosnost v radiálním směru
C_{0ax}	[N]	Únosnost v axiálním směru
C	[N]	Hodnota dynamické zátěže
m_{sk}	[kg]	Hmotnost snímacího kompletu
r_{M1}	[mm]	Rameno kroutícího momentu M_1
M_1	[Nm]	Momentové zatížení ve směru osy x
M_2	[Nm]	Momentové zatížení ve směru osy y
M_3	[Nm]	Momentové zatížení ve směru osy z
M_x	[Nm]	Maximální momentové zatížení ve směru osy x
M_y	[Nm]	Maximální momentové zatížení ve směru osy y
M_z	[Nm]	Maximální momentové zatížení ve směru osy z
g	[m.s ⁻²]	Gravitační zrychlení
L_{km}	[km]	Životnost lineárního vedení
P	[N]	Přepočtená síla pro výpočet životnosti
τ	[MPa]	Smykové napětí
Re	[MPa]	Mez kluzu
α	[-]	Převodní součinitel
l	[mm]	Délka čistého svaru

ÚVOD

Námět na téma této diplomové práce pochází od společnosti AGC Automotive Czech, a.s., výrobní závod Chudeřice. Jedná se o pobočku mezinárodní společnosti AGC Automotive zabývající se výrobou bezpečnostních skel pro automobilový průmysl a je dodavatelem mnoha významných automobilek.

V chudeřickém závodě je v provozu pět přípravných linek Bystronic na kterých se v současné době neprovádí on-line kontrola tloušťky skla.

Úkolem diplomové práce je na základě technických parametrů přípravných linek a možností snímání vzdáleností transparentních materiálů (podpořeno laboratorními testy) navrhnout měřicí zařízení pro bezkontaktní měření tloušťky skla.

Diplomová práce je v souladu se zadáním členěna do pěti kapitol. První kapitola je věnována stanovením technických podmínek pro zabudování měřicího zařízení do jednotlivých přípravných výrobních linek. Ve druhé kapitole je proveden teoretický rozbor možností snímání transparentních materiálů včetně laboratorních testů. Na základě poznatků z prvních dvou kapitol je ve třetí kapitole navrženo několik alternativ jednotlivých prvků měřicího zařízení. Z těchto variant je ve čtvrté kapitole proveden výběr a popis konstrukce měřicího zařízení včetně výpočtů. Poslední pátá kapitola je věnována shrnutí a popsání přínosu navrženého měřicího zařízení.

1. Rozbor současného stavu:

V současné době se měření tloušťky skla před nebo na přípravných řezacích a brousících linkách neprovádí. Provádí se kontrola náhodně vybraných vzorků až po přípravných operacích na speciální stoličce (ruční přeměření rozměrů).

Tloušťka skla je hlavní veličinou mající vliv na výslednou geometrii výrobku. Proto vznikl požadavek na sledování této veličiny a následnému vyhodnocení závislosti tloušťky skla a změna geometrie při gravitačním tvarování autoskel. Právě při gravitačním tvarování se nejvíce projevuje špatná tloušťka skla a je nutno upravovat parametry tvarování.

Zařízení by mělo být umístěno na pěti přípravných linkách Bystronic (na lince Bystronic 2 budou 2 měřicí stanoviště). Z celkem šesti pozic pro měřicí zařízení byly pro podrobné zpracování vybrány dvě varianty (linka Bystronic 2 rameno č. 1 a Bystronic 3(4)), které se konstrukčně nejvíce odlišují, a zařízení na ostatních linkách pak bude pouze variací těchto dvou variant.

1.1. Stanovení technických podmínek pro zabudování zařízení do výrobní linky

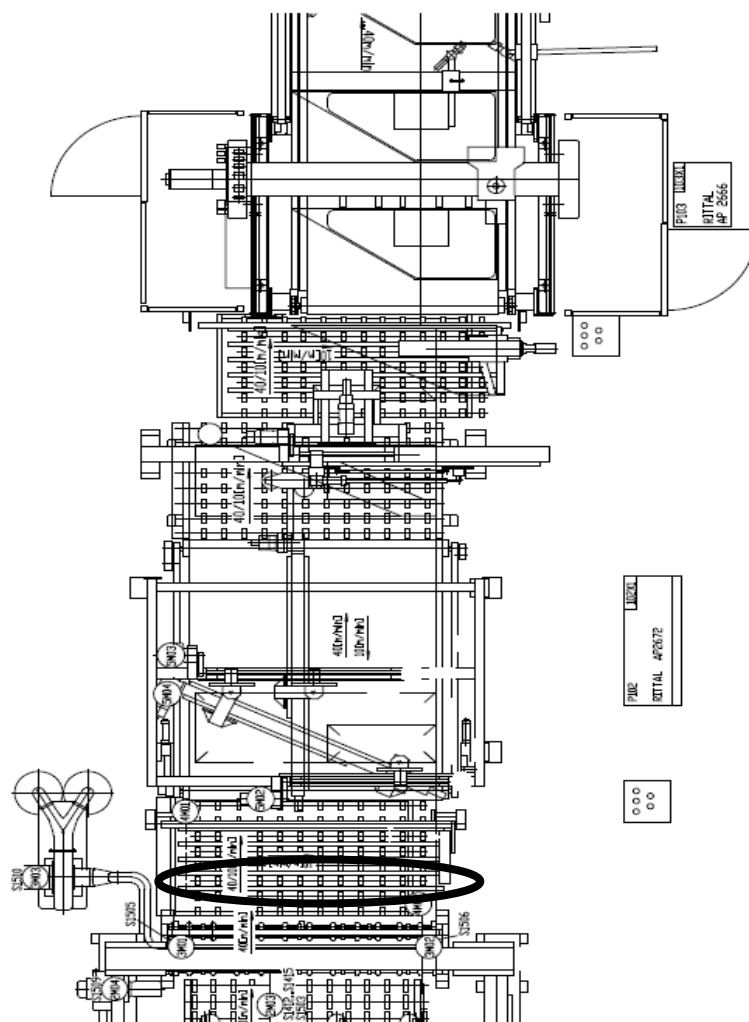
Pro výrobu bočních kalených a laminovaných skel se používají následující typy tloušťek skel: 1,7 mm a 1,9 mm (pouze pro laminovaná, boční skla), 3,15 mm (nejpoužívanější), 3,85 mm, 4,8 mm, 4,95 mm. Sortiment je velice široký. Obsahuje přibližně 300 druhů skel [10].

Ohledně změny sortimentu se snaží o dodržení optimální délky jedné výrobní kampaně (jednoho výrobku, modelu) a to minimálně 8 hodin (čím více tím lépe). Momentálně se délka pohybuje kolem 8-12 hodin, takže ke změně sortimentu dochází přibližně dvakrát za den. Vzhledem k tomu že nejčastěji používanou tloušťkou skla je 3,15 mm nemusí vždy se změnou výrobního modelu dojít i ke změně tloušťky skla, bylo by dobré s tím ale počítat.

Všechna skla s odchylkou větší než 0.1mm od nastavené (nominální hodnoty) musí být vyhodnocena jako NOK (nevyhovující).

1.1.1. Linka Bystronic 1

Základním problémem je nedostatek prostoru pro zástavbu. Za instalací odsávacího zařízení navazuje zařízení pro detekci cínové strany. Za tímto zařízením je úzký pruh prostoru pro možné vestavění portálového rámu se senzory. Pokud by se ukázalo toto řešení technicky nemožné, případně velmi nákladné, je zde možnost umístit zařízení na konec linky za myčku. Případnou výhodou by byla čistota měřených ploch, ale velká nevýhoda spočívá v ekonomickém pohledu. Sklo v této fázi již podstoupilo pracovní operace a získalo hodně na přidané hodnotě. Layout linky Bystronic 1 je na obr. 1 s vyznačeným místem pro případnou zástavbu. Detail místa pro zástavbu je na obr. 2.



Obr. 1: Layout linky Bystronic 1 s vyznačeným místem pro zástavbu měřícího zařízení [10]



Obr. 2: Detail místa pro zástavbu na lince Bystronic 1

Základní rozměry:

- Výška dopravníku: 940 mm.
- Průchodnost pod dopravníkem: 150-160 mm.
- Měření nutno provádět na střední ose dopravníku: 1100 mm od okraje.

Velice složitá bude zástavba spodního senzoru pod linkou. Jako nejlepší varianta se zdá být použití konfokálního senzoru, který umožňuje měření z jedné strany.

1.1.2. Linka Bystronic 2

U linky Bystronic 2 se budou řešit dva konkrétní případy umístění. Na rameno č. 1 a rameno č. 2, jež mají společné zakládání skleněných tabulí.

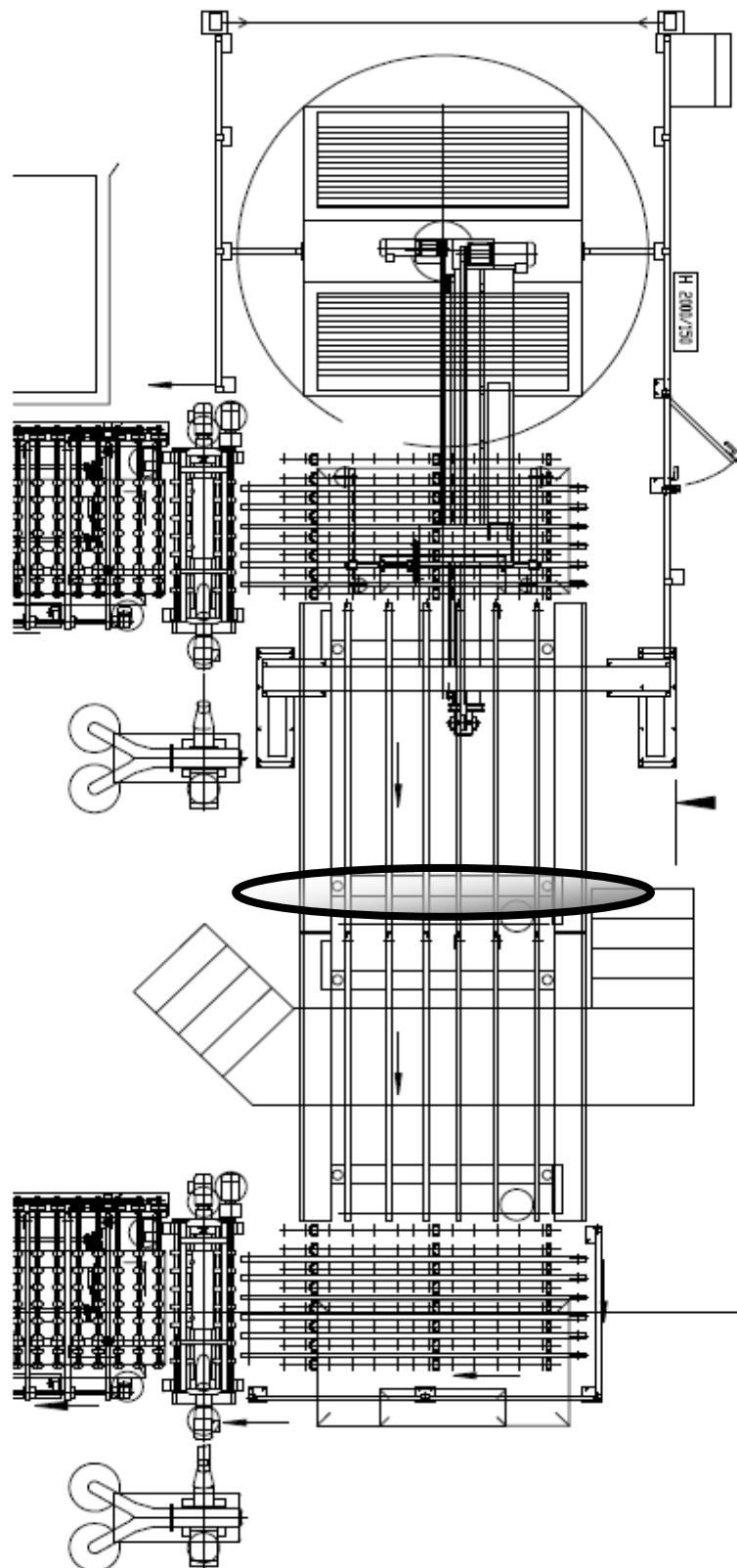
1.1.2.1. Rameno č. 1

Měřicí zařízení by bylo umístěno na dopravník následující za místem pro zakládání skla. V tomto případě má sklo z ekonomického hlediska nejnižší přidanou hodnotu a je zde dostatek prostoru pro zástavbu. Portálová konstrukce se zde jeví velice výhodnou. Pohyb skla je zajištěn pásy, což nám poskytuje více než dostatečnou průhledovou plochu.

Základní rozměry:

- Výška dopravníku: 940 mm.
- Průchodnost pod dopravníkem: 600 mm.
- Měření provádět na střední ose dopravníku 1100 mm od okraje, ale s možností příčného posuvu měřící jednotky.

Layout ramena č. 1 linky Bystronic 2 je zobrazen na obr. 3 s vyznačeným místem umístění měřicího zařízení. Detail místa pro zástavbu je na obr. 4.



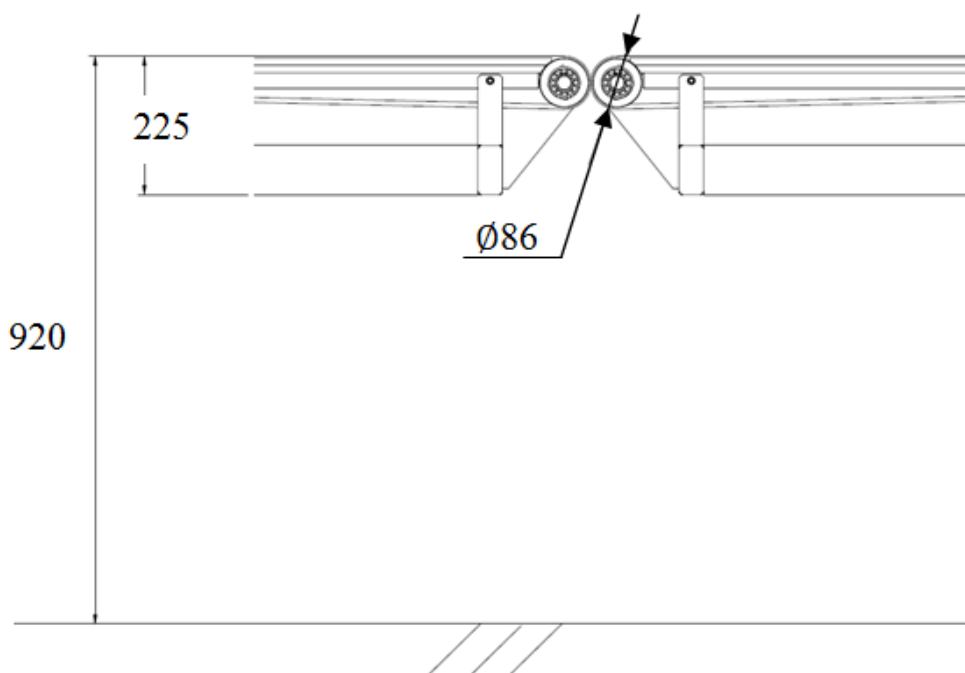
Obr. 3: Layout linky Bystronic 2 rameno č. 1 s vyznačeným místem umístění měřícího zařízení [10]



Obr. 4: Detail místa pro zástavbu na lince Bystronic 2 rameno 1

Technické parametry dopravníku:

- Rychlost posuvu skla 40 m/min.
- Základní rozměry jsou zobrazeny na obr. 5.



Obr. 5: Boční profil pásového dopravníku

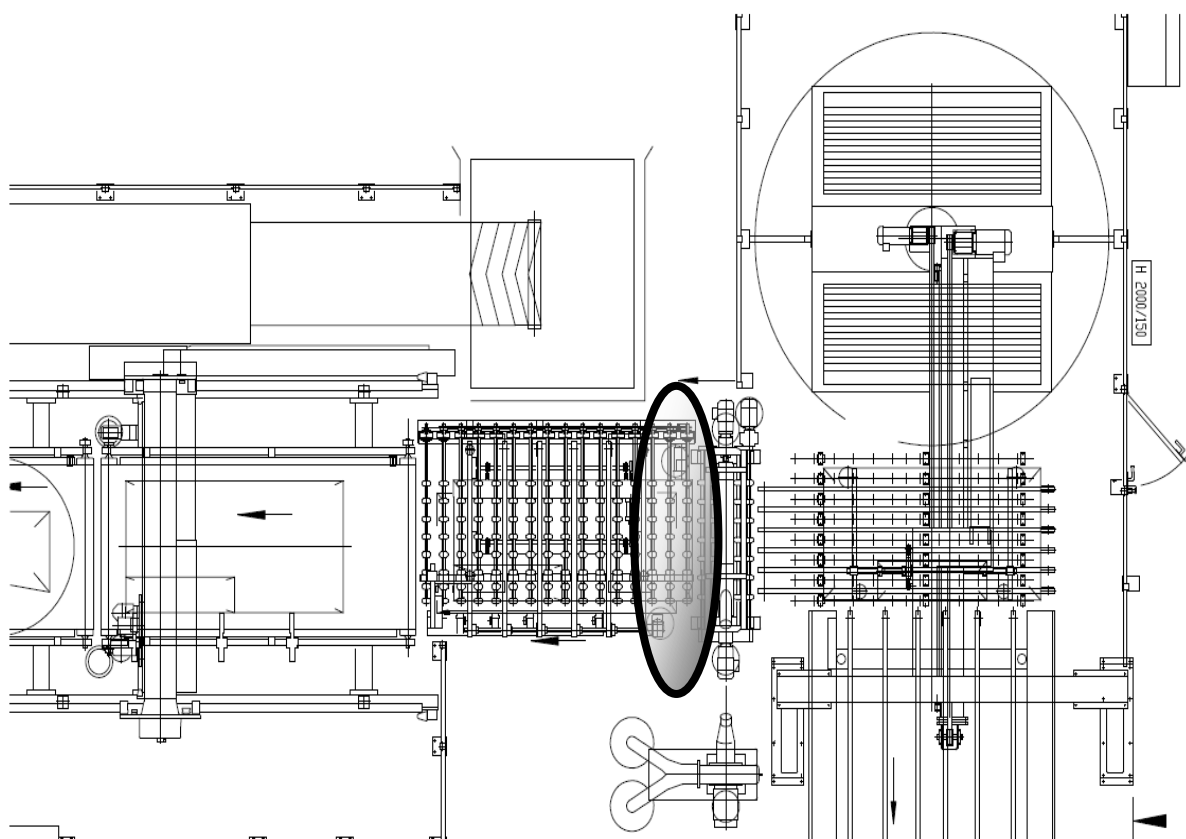
1.1.2.2. Rameno č. 2

I v tomto případě by měřicí zařízení bylo umístěno na dopravník ihned za stanoviště pro zakládání skla. Zde je místa pro zástavbu méně než u ramena číslo 1, ale i tento prostor se zdá být dostatečný. Portálová konstrukce může být příhodně umístěna za odsávání a před zařízení na detekci cínové strany skla.

Základní rozměry:

- Výška dopravníku: 940 mm.
- Průchodnost pod dopravníkem: 500-600 mm.
- Měření provádět při okraji dopravníku: 400 mm od okraje.

Layout ramena č. 2 je znázorněn na obr. 6 s vyznačeným místem umístění měřicího zařízení. Detail místa pro zástavbu je na obr. 7.



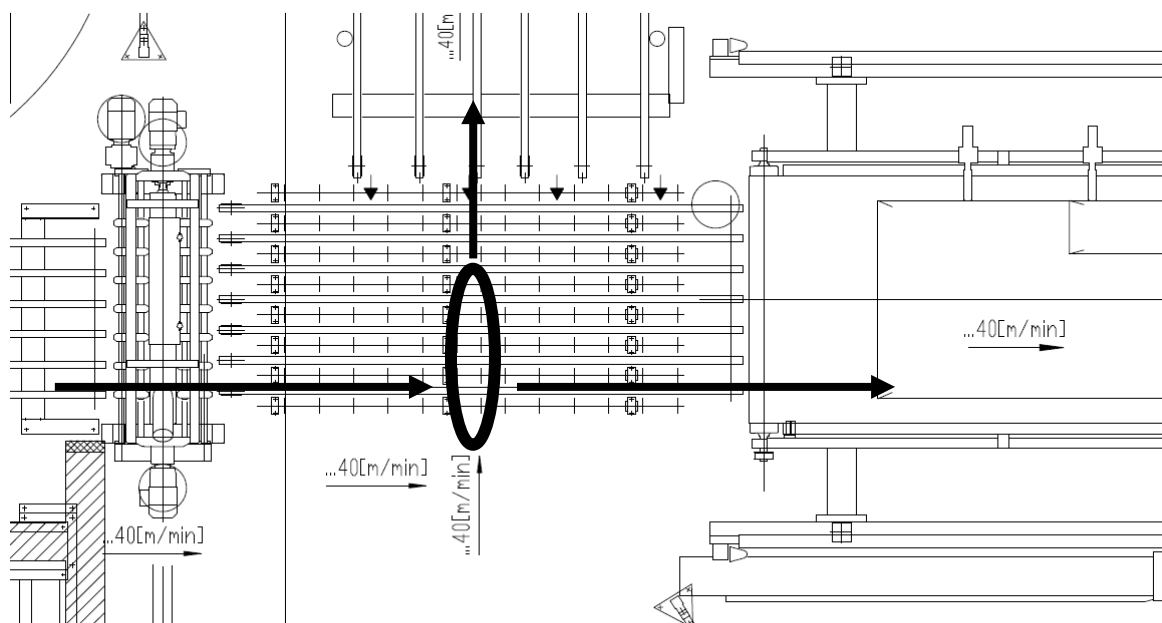
Obr. 6: Layout linky Bystronic 2 rameno č. 2 s vyznačeným místem umístění měřicího zařízení [10]



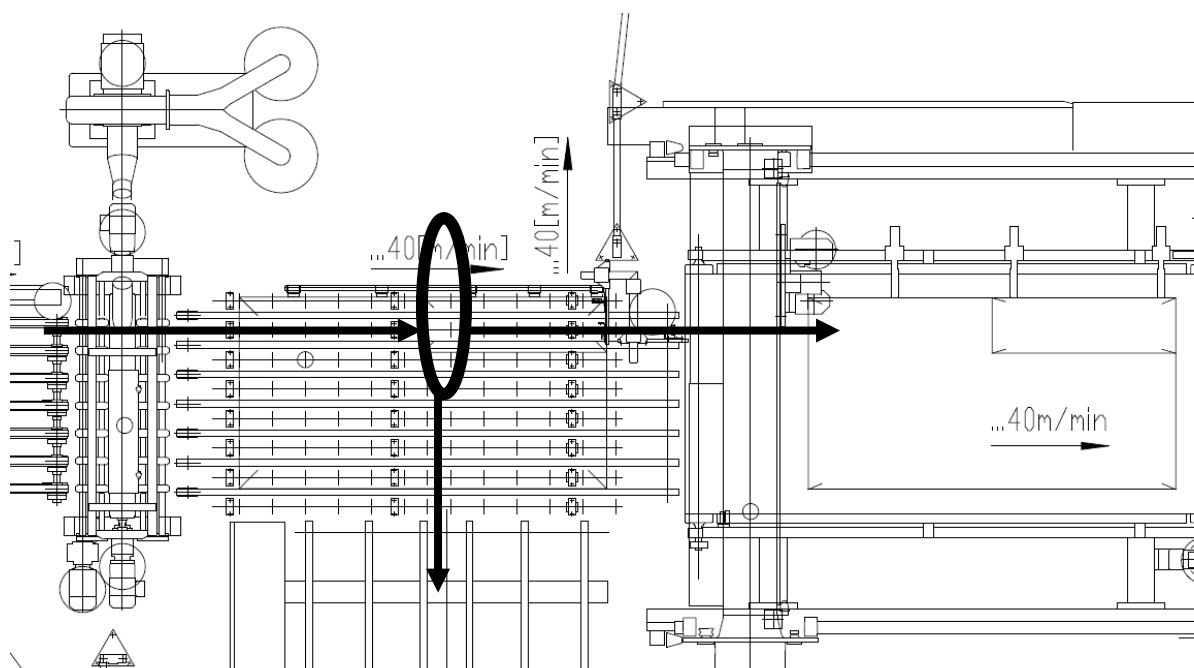
Obr. 7: Detail místa pro zástavbu na lince Bystronic 2 rameno 1

1.1.3. Linka Bystronic 3,4

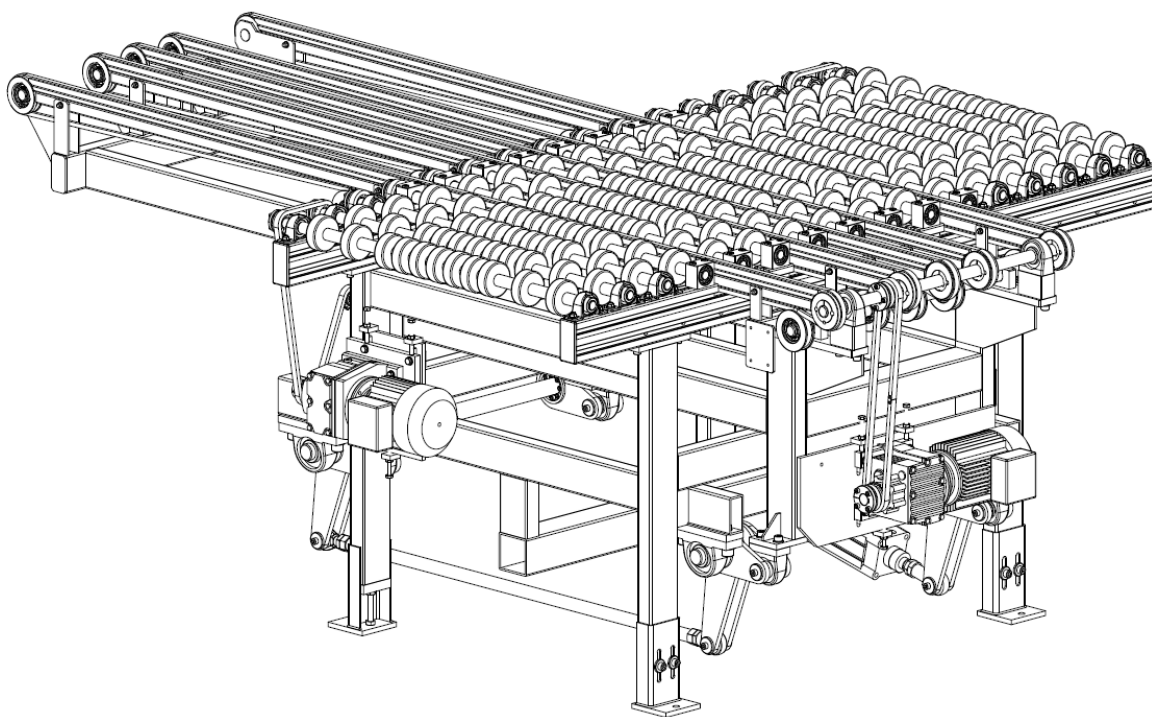
Linky Bystronic 3 a 4 jsou konstrukčně identické, pouze zrcadlově převrácené. Zařízení na měření tloušťky skla by byla umístěna na začátek linky a to do konstrukce křížového stolu. To přináší konstrukční omezení koncepce rámu, jelikož základna může být umístěna jen na jedné straně dopravníku. Zde se jako dobré řešení zdá být rám tvaru C. K tomuto konstrukčnímu řešení přispívá fakt, že sklo se pohybuje při vnějším okraji dopravníku (blíže k možnému umístění rámu), tím pádem ramena se senzory mohou být kratší a z toho vyplývá větší celková tuhost konstrukce. Pokud by tato varianta nevyhovovala je možno umístit měřicí zařízení na jednotlivá ramena výrobní linky za křížový stůl. Na obr. 8 a 9 je znázorněn layout linky Bystronic 3 a 4 s označením místa umístění měřicího zařízení, model křížového stolu je zobrazen na obr. 10. a detail místa pro zástavbu umístění na obr. 11.



Obr. 8: Layout linky Bystronic 3 se znázorněným pohybem tabule skla [10]



Obr. 9: Layout linky Bystronic 4 se znázorněným pohybem tabule skla [10]



Obr. 10: Model křížového stolu [10]



Obr. 11: Detail místa pro zástavbu na lince Bystronic 3,4

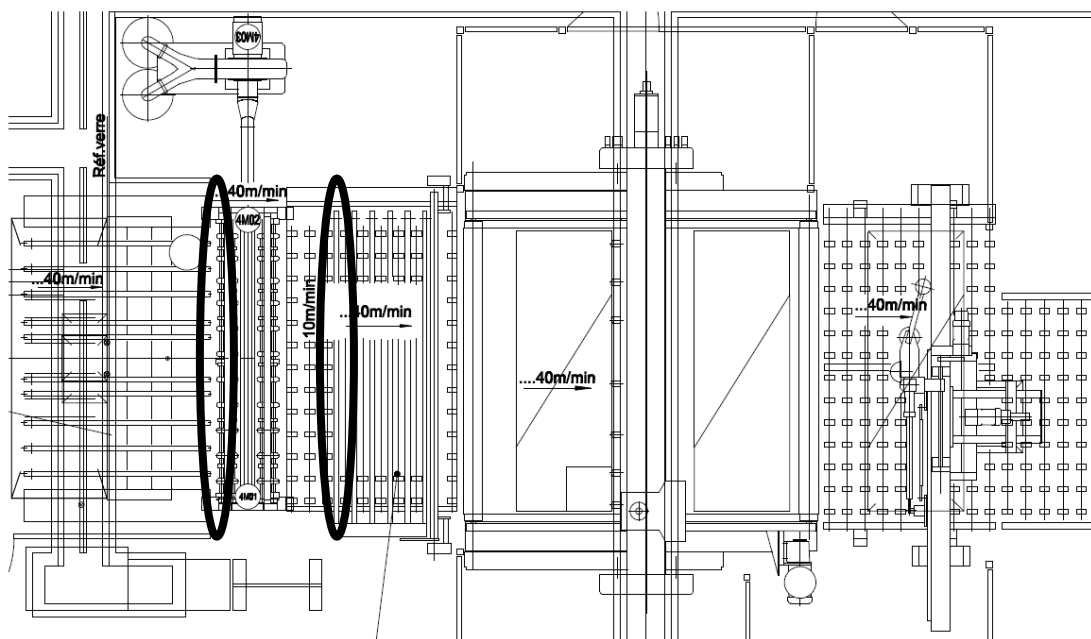
1.1.4. Linka Bystronic 5

Linka Bystronic 5 je pravděpodobně nejsložitější případ. Místa pro zástavbu na začátku linky je minimálně. Jako možnost se jeví umístění portálového rámu těsně za odsávání před detekci cínu, případně těsně za detekci cínu. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat možné kolizi spodní části rámu s vlastní konstrukcí dopravníku. Možnost umístění zařízení na měření tloušťky skla na konec linky se zde zdá být konstrukčně nejvhodnější.

Základní rozměry:

- Výška dopravníku: 940 mm.
- Měření nutno provádět na střední ose dopravníku: 1600 mm od okraje.
- Šířka prostoru pro možnou zástavbu: 170 mm.

Layout linky Bystronic 5 je znázorněn na obr. 12 s označením místa pro případné umístění měřicího zařízení a detail místa pro umístění zařízení je na obr. 13.



Obr. 12: Layout linky Bystronic 5 s vyznačením místa na umístění měřicího zařízení

[10]



Obr. 13: Detail místa pro zástavbu na lince Bystronic 5

1.2. Shrnutí

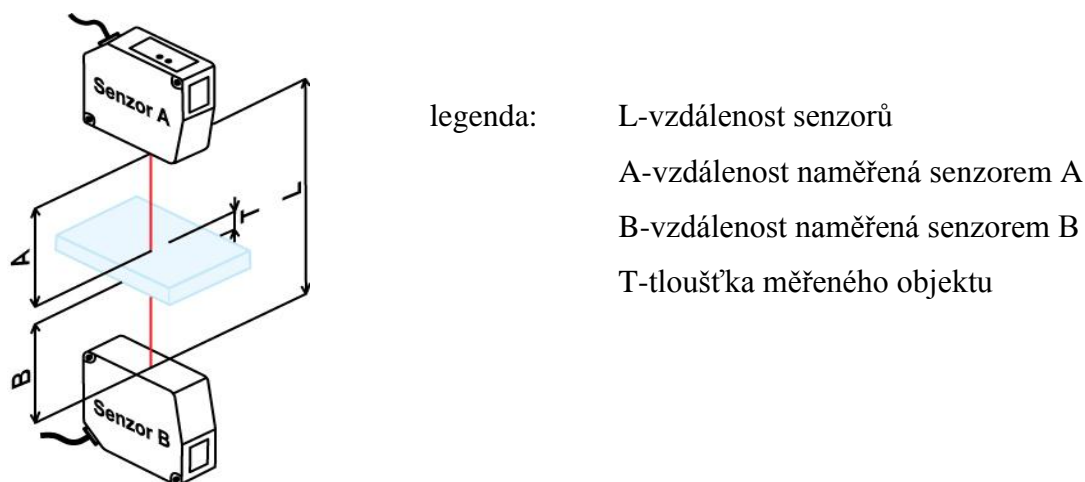
Na základě odborné praxe a informací získaných při konzultacích s oddělením engineeringu AGC Automotive, Chudeřice, se podařilo stanovit potřebné základní technické podmínky pro zabudování měřicího zařízení do přípravných linek ve výrobě autoskel. Byla vybrána z technického, ekonomického a dispozičního hlediska nejlepší místa pro zabudování měřicího zařízení. Společnou vlastností těchto míst je snaha umístit zařízení co nejvíce na začátek přípravné výrobní linky (menší přidaná hodnota skla, která roste s množstvím následujících pracovních operací), dobrá přístupnost k horní měřené ploše skla a problematika možné kolize spodní části měřicího zařízení s konstrukcí dopravníku. Tato problematika je zohledněna při návrhu konstrukčního řešení měřicího zařízení.

2. Metody měření tloušťky transparentních materiálů

K měření tloušťky se v největší míře využívá senzorů na měření vzdálenosti. Měření se dá rozdělit na nedestruktivní/destruktivní, bezkontaktní/kontaktní a jednostranné/dvoustranné. V následující kapitole budou rozebrány fyzikální principy metod bezkontaktního měření tloušťky skla a to konkrétně senzorů laser-optických a konfokálních, u kterých je nejlépe zvládnuta problematika snímání transparentních materiálů.

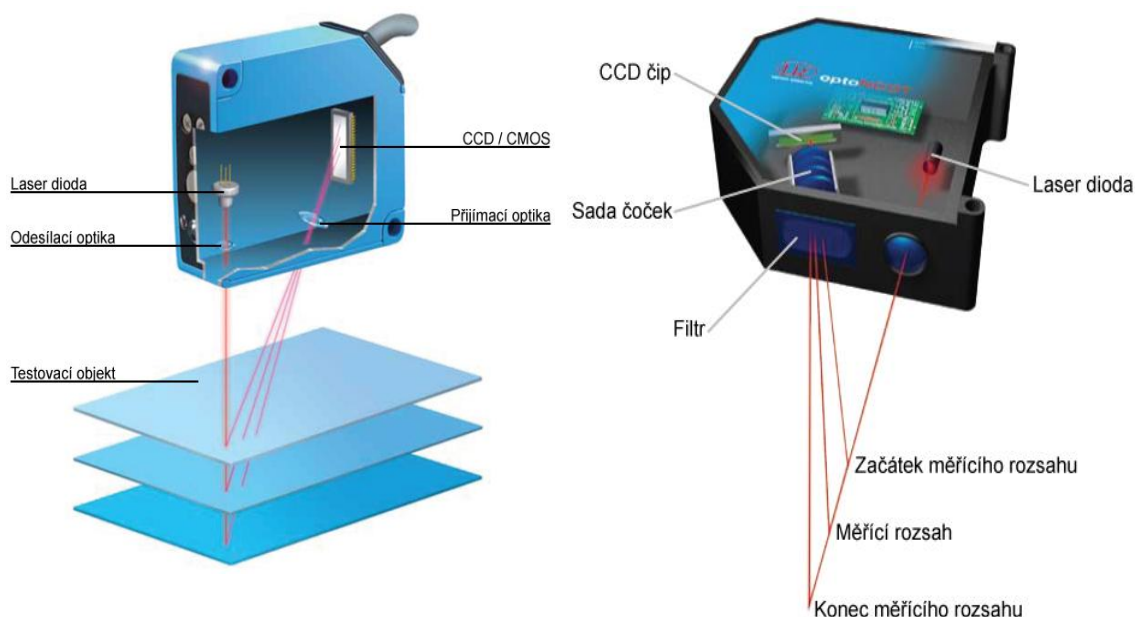
2.1. Laser-optické senzory

Laser-optické senzory se nejčastěji používají u dvoustranného měření. Dvoustranné měření tloušťky je zajištěno nejméně jedním párem senzorů, které jsou nainstalované na společné optické ose. Stanovení tloušťky je znázorněno na obr. 14.



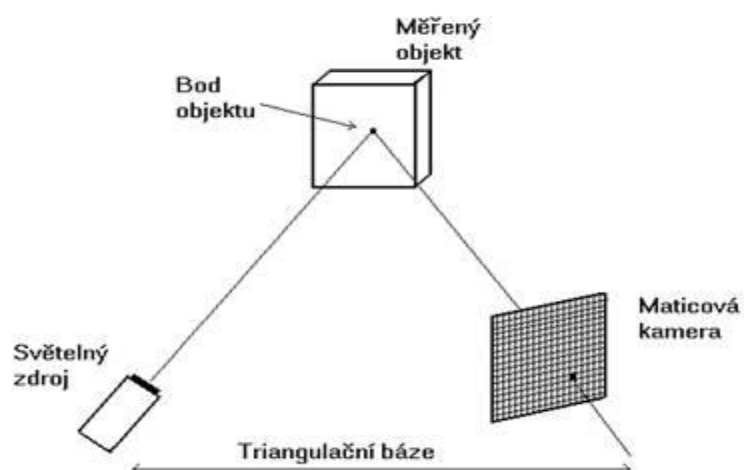
Obr. 14: Stanovení tloušťky při dvoustranném měření za použití dvojice senzorů [5]

Laser-optické senzory pracují na principu triangulace (viz obr. 15). Laserová dioda vysílá přes soustavu čoček světelný bod na měřený povrch. Světelný odraz z tohoto bodu je zachycen optickým přijímačem senzoru a dopadá na světlo-citlivý čip (CMOS, CCD). Při změně tloušťky objektu dopadá odraz světelného bodu do jiné polohy na čipu. Právě z polohy dopadajícího odrazu se počítá vzdálenost objektu.



Obr. 15: Schéma senzoru pracujícího na principu triangulace [1] [5]

Zdroj světla spolu se snímačem a osvětleným bodem na zkoumaném objektu tvoří tzv. triangulační trojúhelník (obr. 16). Spojnici světelný zdroj - snímač nazýváme triangulační bází (základnou). Na straně zdroje je úhel svíraný s triangulační bází neměnný, kdežto na straně snímače je úhel určen proměnnou pozicí vysvíceného bodu CCD snímače. Z velikosti tohoto úhlu a na základě znalosti triangulační báze lze určit z-ovou souřadnici objektu.

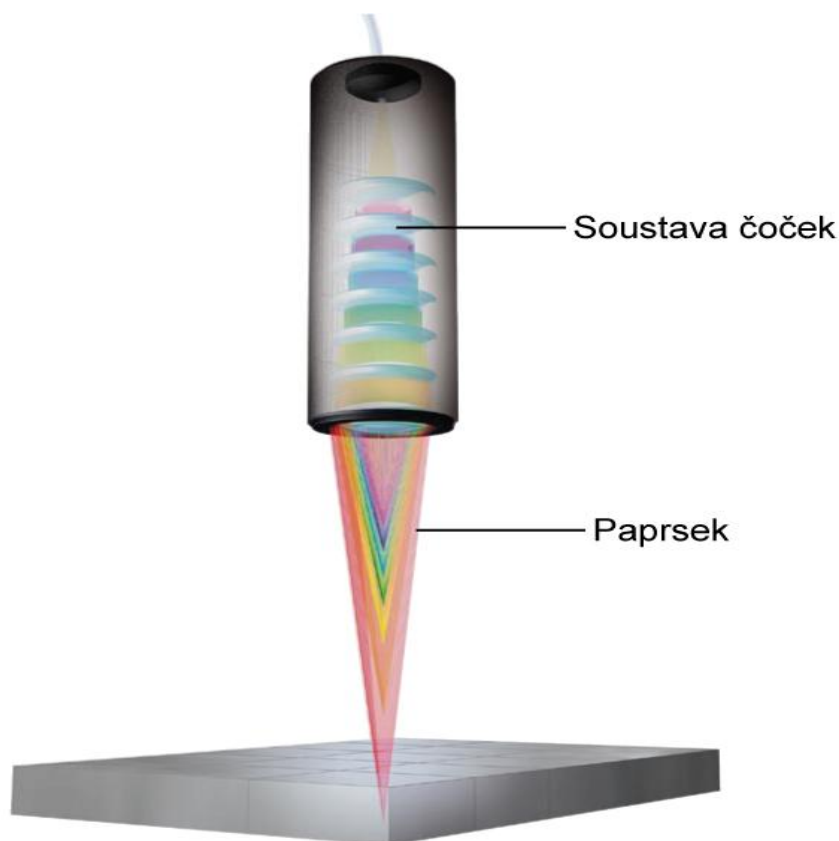


Obr. 16: Triangulační trojúhelník (1D triangulace) [1]

Mezi hlavní výhody této metody patří malý měřicí bod, velký měřicí dosah, vysoké rozlišení, výborná linearita (maximální odchylka mezi výstupním signálem a ideální, přímou charakteristikou) a vysoká rychlost měření.

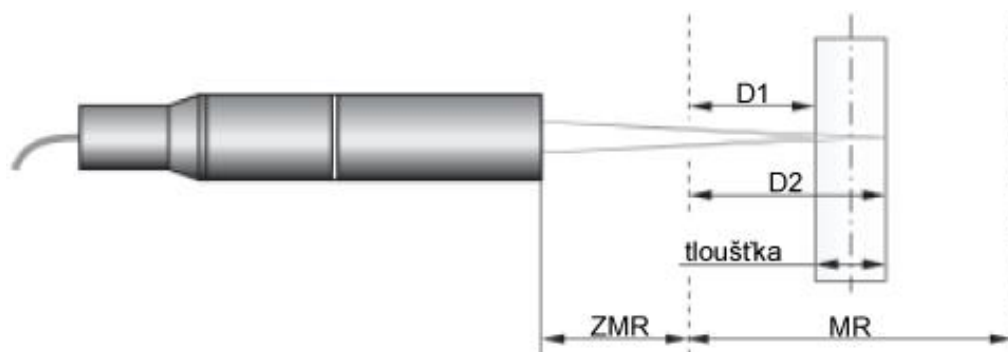
2.2. Konfokální senzory

Principem konfokální technologie je zaostření polychromatického bílého světla na cílený povrch za použití optického systému několika čoček. Čočky jsou nastaveny tak, že bílé světlo je rozptýleno do monochromatického (jednobarevného) světla s kontrolovanou barevnou odchylkou. Stanovená barevná odchylka je přiřazena určité vlnové délce podle továrního nastavení. Pouze vlnová délka, která je přesně zaostřena na cílový povrch, je použita pro měření. Světlo odražené z měřeného povrchu prochází konfokálním zařízením do přijímače, který detekuje a vyhodnocuje spektrální změny. Tato metoda umožňuje velice přesné měření u difuzních i zrcadlových materiálů. U transparentních materiálů (např.: sklo, plast) může být prováděno jednostranné měření tloušťky. Konfokální senzor je znázorněn na obr. 17.

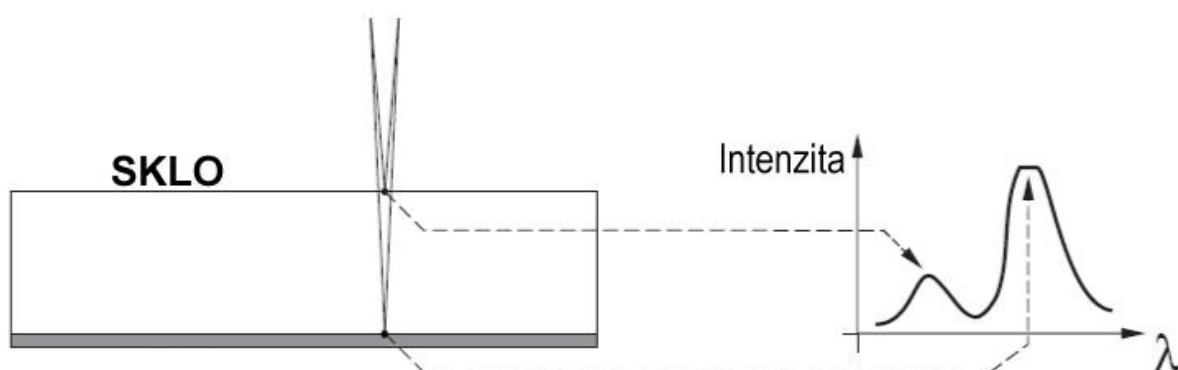


Obr. 17: Konfokální senzor [1]

V nastavení pro měření tloušťky senzor detekuje dva signály odrazu, od přední strany a od zadní strany transparentního materiálu (viz obr. 18). Na výstupním signálu je to prezentováno dvojicí výrazných špiček. Tato peak-peak vzdálenost reprezentuje tloušťku měřeného objektu (obr. 19).



Obr. 18: Měření tloušťky transparentního materiálu (ZMR..začátek měřicího rozsahu, MR..měřící rozsah, D1..vzdálenost přední plochy, D2..vzdálenost zadní plochy) [1]

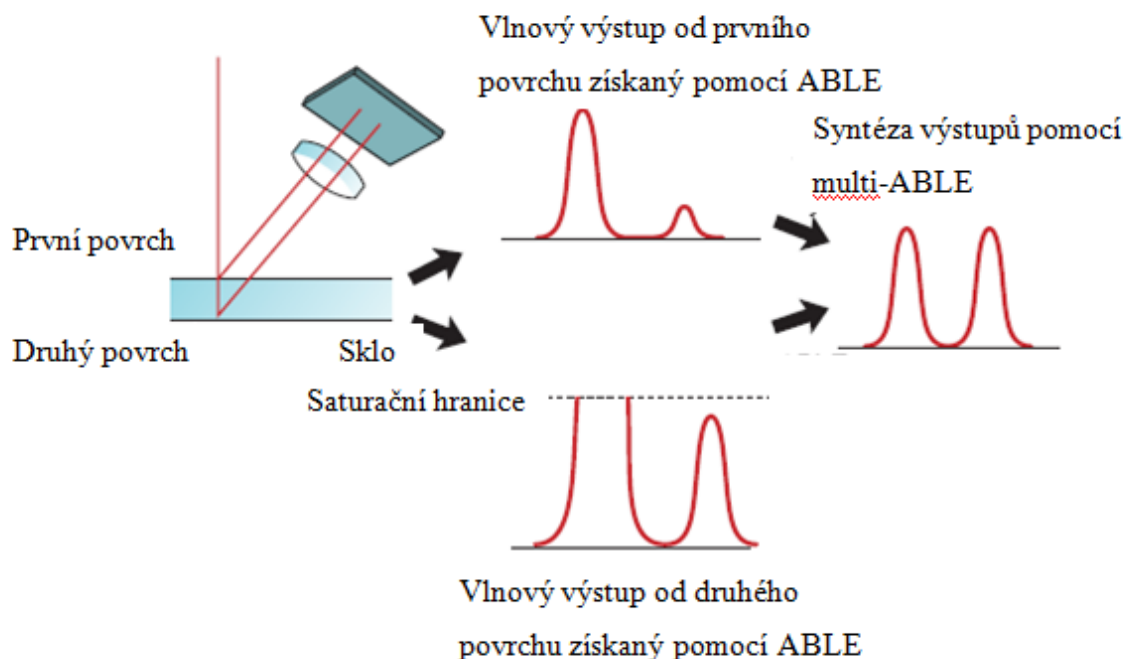


Obr. 19: Ukázka výstupního signálu [1]

Mezi hlavní výhody použití konfokálních senzorů patří možnost měření tloušťky jen pomocí jednoho senzoru a velice vysoká přesnost měření.

2.3. Multi-ABLE systém

Systém Multi-ABLE (Active Balanced Laser control Engine) od firmy Keyence. Tato varianta je uvedena spíše pro zajímavost, jelikož se jedná o novou metodu, která je stále v patentovém řízení. Základem této metody je vícenásobný odraz, jak je patrné z obr. 20. Mezi hlavní klady patří minimální vliv povrchových vlastností měřeného skla. Senzor je osazen Li-CCD (linearizované CCD) s rozlišením 0,05 μ m.



Obr. 20: Multi-ABLE systém [6]

2.4. Laboratorní testy snímačů

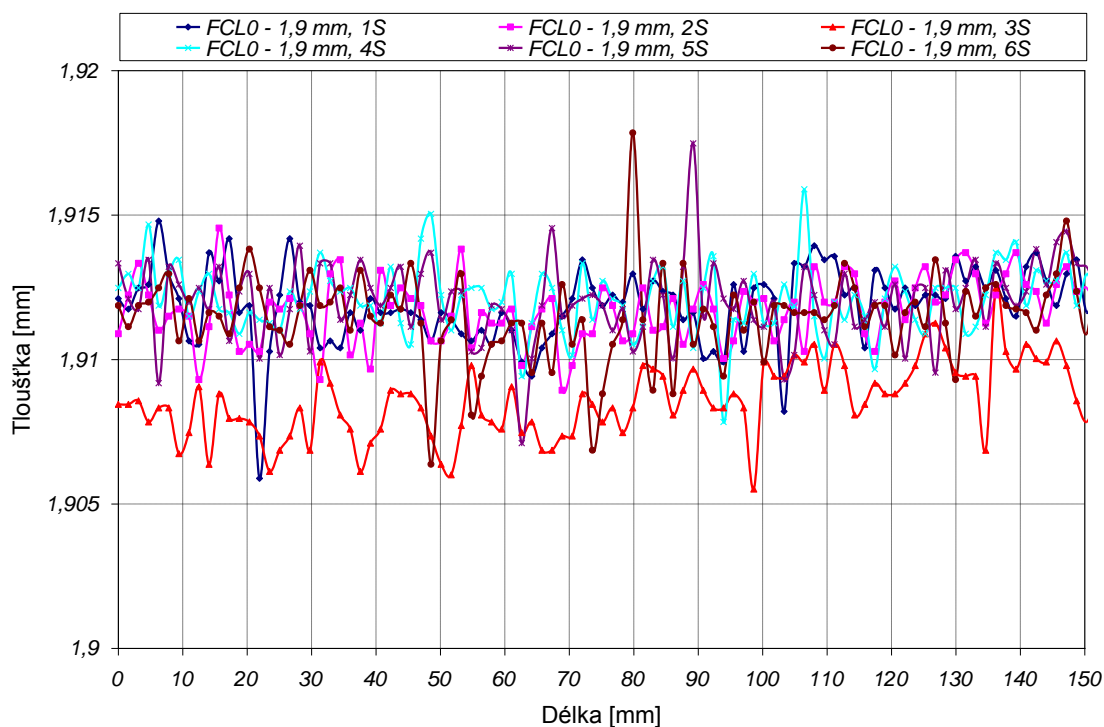
Firma AGC Automotive Czech používá senzory značky SICK nebo KEYENCE. V průběhu ledna 2008 bylo v rámci pracoviště katedry sklářských strojů a robotiky provedeno cílené testování bezkontaktních laserových snímačů firmy SICK s typovým označením OD_25_01T1 (referenční vzdálenost 25 mm, měřicí rozsah ± 1 mm, rozlišení 0,1 μ m) [9]. Dále bylo nutné celý systém kalibrovat tak, aby snímaná analogová hodnota signálu odpovídala reálné tloušťce skla (měřeno dotykově) a

souhlasila s automaticky v reálném čase počítanou hodnotou, která je výstupem A/D převodníku AOD-G-P1 a úzce souvisí s přesným nastavením vzdálenosti dvojice snímačů. Ke způsobu kalibrace a zpracování výstupních dat je nutno přihlídnout při navrhování měřicího zařízení (viz kap. 3.5).

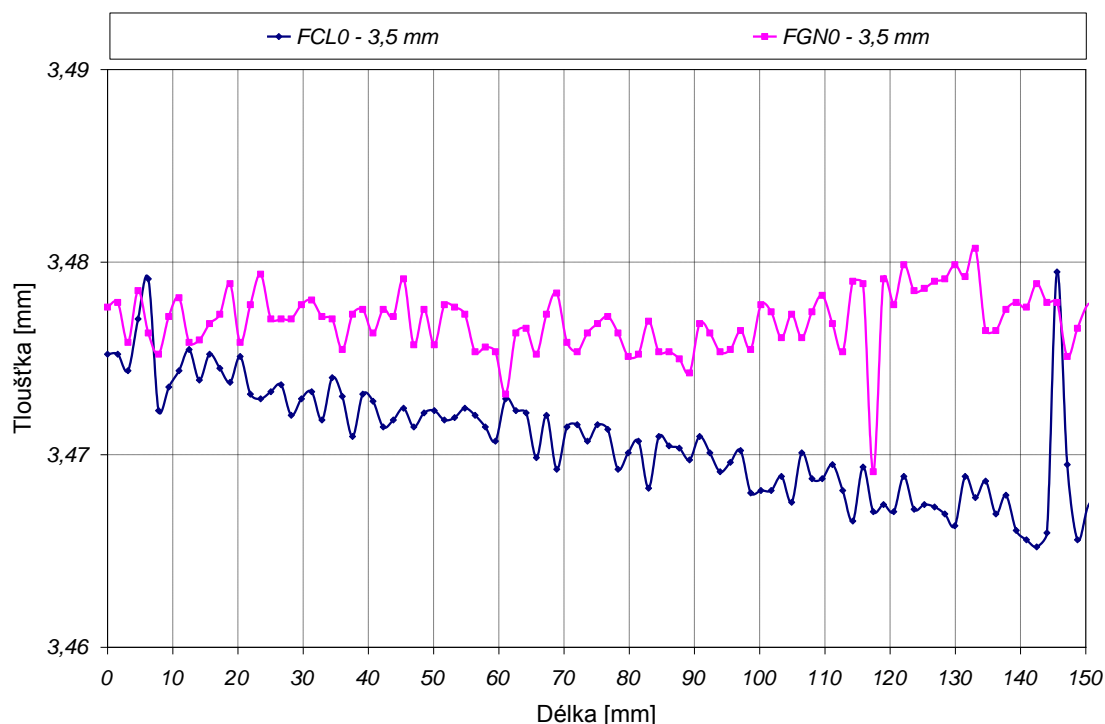
Výsledky testů snímačů SICK viz obr. 21 a obr. 22.

legenda:

FCL0 - 1,9 mm, 1S	upnutí vzorku, konfigurace polohy snímačů, denní světlo
FCL0 - 1,9 mm, 2S	přepnutí vzorku, denní světlo
FCL0 - 1,9 mm, 3S	přepnutí vzorku, osvit
FCL0 - 1,9 mm, 4S	přepnutí vzorku, rekonfigurace polohy snímačů, osvit
FCL0 - 1,9 mm, 5S	bez osvit, denní světlo
FCL0 - 1,9 mm, 6S	opětovné upnutí vzorku, denní světlo

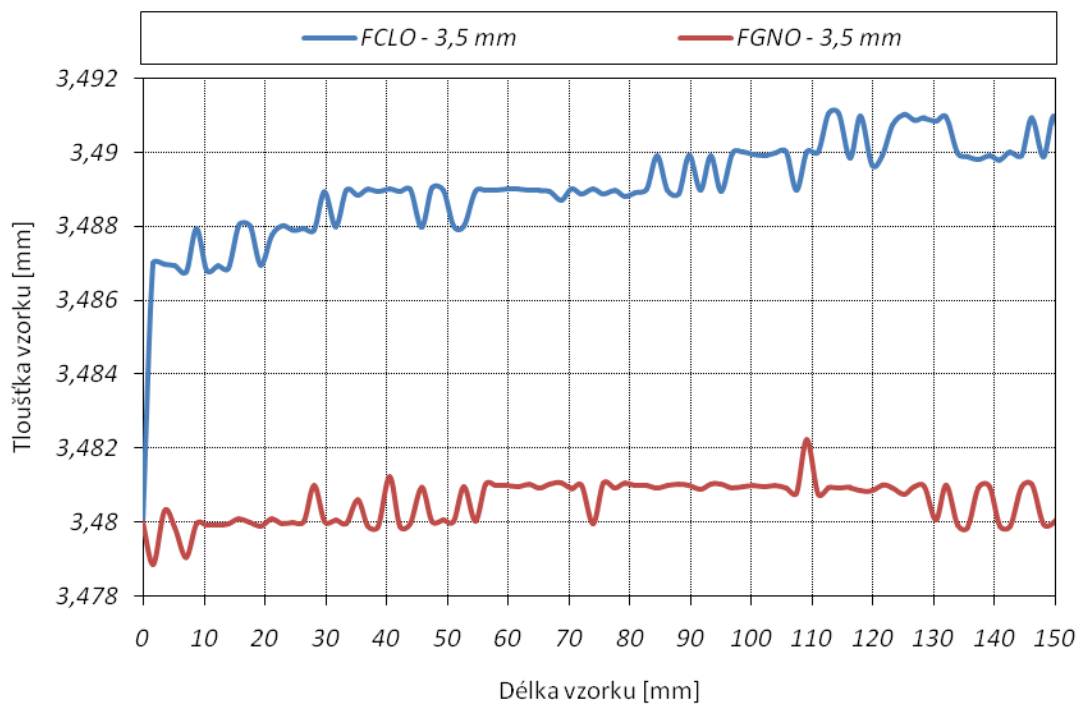


Obr. 21: Vzorek skla s nominální tloušťkou 1,9 mm

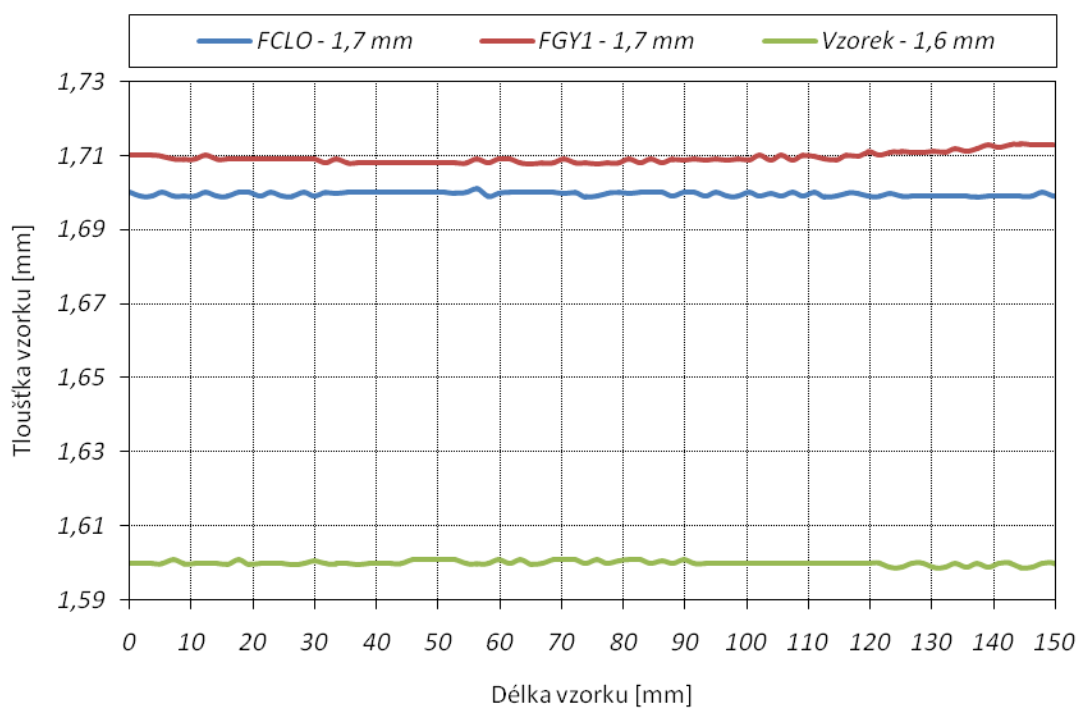


Obr. 22: Vzorek skla s nominální tloušťkou 3,5 mm

Začátkem července 2008 bylo provedeno cílené testování bezkontaktních laserových snímačů firmy KEYENCE s typovým označením LK-G15 v kombinaci s multifunkční vyhodnocovací jednotkou LK-G3001 a zobrazovacím modulem LK-GD500, resp. se sestavou LK-G3001V (referenční vzdálenost 10 mm, měřicí rozsah ± 1 mm, rozlišení $0,02 \mu\text{m}$) [8]. Při testování byly simulovány rušivé vlivy osvětlení měřených ploch. Testy byly prováděny na sklech různé tloušťky a zbarvení. Dále bylo nutné celý systém kalibrovat tak, aby snímaná analogová hodnota signálu odpovídala reálné tloušťce skla. (podle etalonu proměřeného dotykově). Současně bylo nutné nastavit napětí na výstupu snímače tak, aby souhlasilo s výstupní číselnou hodnotou jednotky LK – G3001. Ukázka výsledku měření skla tloušťky 5 mm viz obr. 23 a obr. 24 (FCLO-čiré sklo, FGNO-zelené sklo).



Obr. 23: Vzorek skla s nominální tloušťkou 3,5 mm

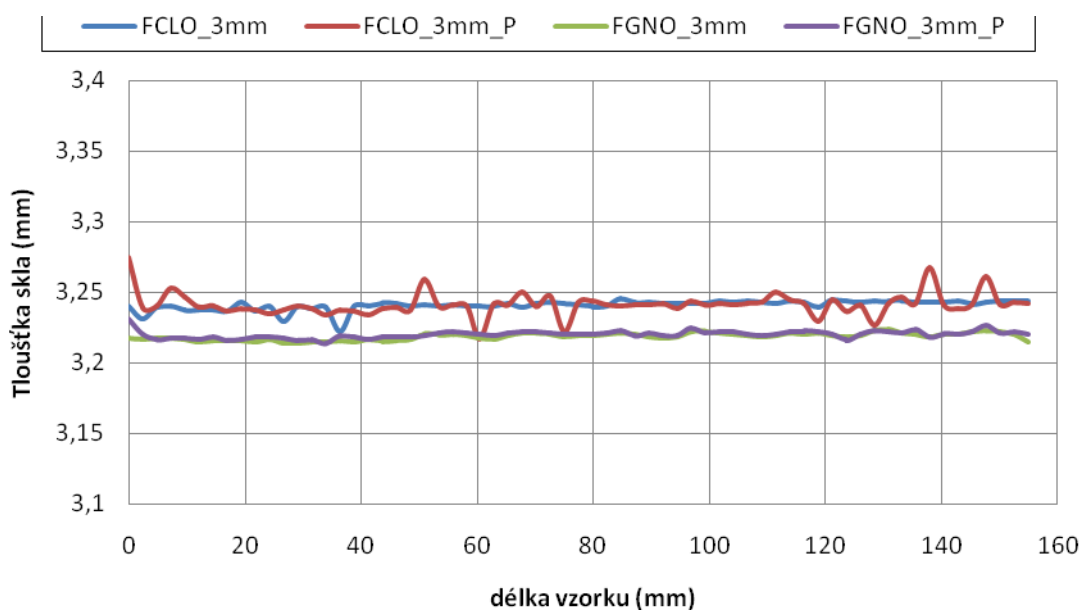


Obr. 24: Vzorek skla s nominální tloušťkou 1,6 mm a 1,7 mm

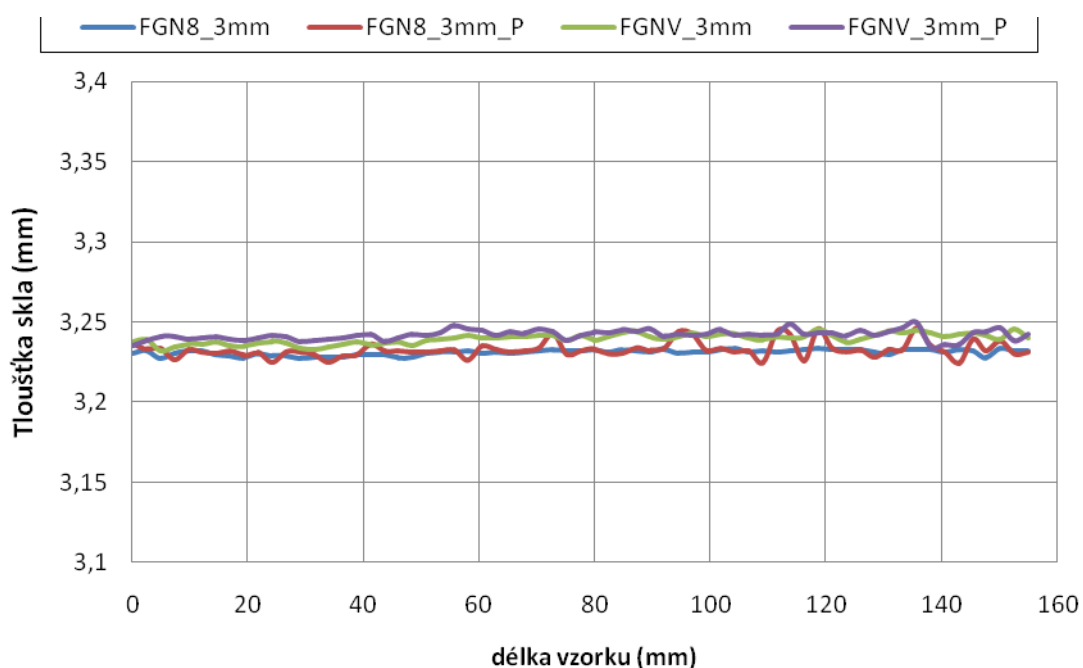
V březnu 2009 byly provedeny testy snímačů SICK OD_25_01T1 na vliv prachu a prášku, jenž se používá při paletizaci skla proti slepování jednotlivých tabulí.

Popis měření: Nejprve byl pro porovnání naměřen vzorek čistý a posléze byl na něj nanesen a štětečkem rovnoměrně rozprostřen prášek proti slepování tabulí skel.

Měření prokázalo, že toto znečištění nemá výrazný vliv na výsledek. Ukázka výsledků viz obr. 25 a obr. 26.

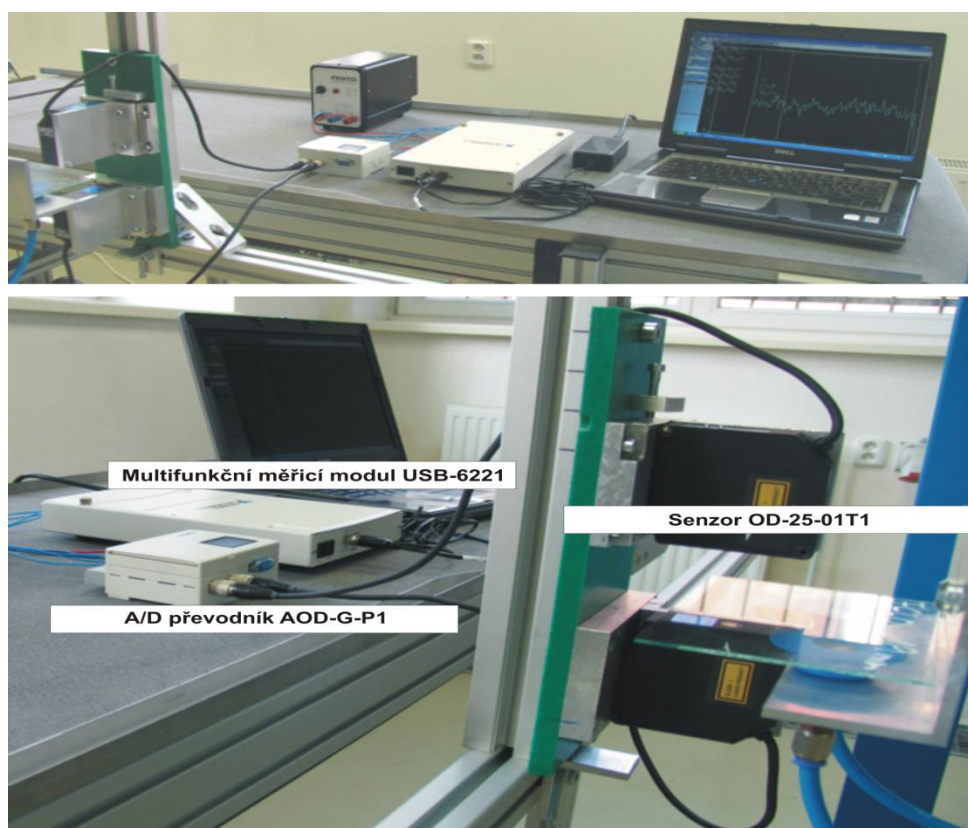


Obr. 25: Vzorek skla nominální tloušťky 3 mm (P značí znečištění vzorku práškem)

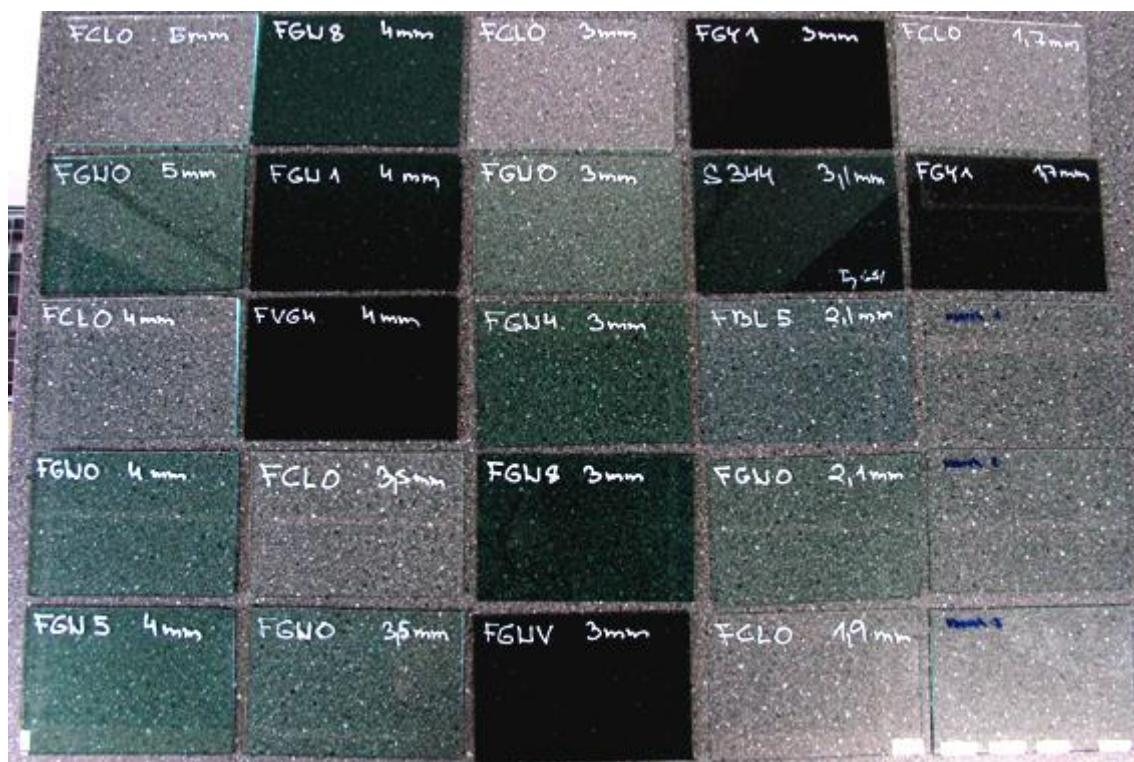


Obr. 26: Vzorek skla nominální tloušťky 3 mm (P značí znečištění vzorku práškem)

Ukázka laboratorního pracoviště na obr. 27 a soubor proměřovaných vzorků na obr. 28.



Obr. 27: Ukázka laboratorního pracoviště



Obr. 28: Soubor vzorků

2.5. Shrnutí laboratorních testů

Testovací analýza jednoznačně prokázala, že snímač firmy Sick je vhodnou alternativou pro on-line měření tloušťky plochého skla. Systém dále nevykazoval výraznou závislost na změnách okrajových podmínek měření, ať už se jedná o osvit nebo znečištění práškem, a jeví se tedy v této fázi testování jako prakticky využitelný ve výrobní lince.

U testování senzorů firmy Keyence bylo zjištěno, že systém lze přizpůsobit jak osvitovým podmínkám, tak i barevným odstínům skla, přičemž během testování nebyly naměřeny výrazné odchylky ve vztahu k těmto dvěma faktorům. Senzory Keyence se oproti senzorům Sick ukázaly jako méně vnímavé k okolním vlivům a díky vyspělým CCD čipům trpěly menším „šumem“.

3. Alternativy řešení měřicího zařízení

V této kapitole se budu zabývat jednotlivými prvky měřicího zařízení. Jedná se o rám včetně kotvení, lineární vedení pro příčný posuv, elektromechanické pohonné jednotky pro vertikální posuv (nastavení senzorů do referenční vzdálenosti) a senzory. Bude vždy popsáno několik variant daných prvků se vzájemným porovnáním, které bude východiskem pro výběr konkrétní varianty.

3.1. Rám

Rám měřicího zařízení bude ukotven samostatně, nezávisle na přípravné výrobní lince a to pro omezení přenosu vibrací. Budou řešeny následující varianty: svařovaná sestava ocelových profilů, stavebnicový typ duralových profilů a kombinace předešlých dvou typů. Koncepcí se bude jednat o rámy portálové konstrukce kvůli zachování vyšší tuhosti než je u otevřených rámu. K porovnání tuhostí jednotlivých rámu provedeny výpočty pomocí metody konečných prvků.

3.1.1. Svařenec

Rámem měřicího zařízení je svařenec otevřených ocelových profilů. Otevřený profil zvolen pro snadnější montáž dalších přídatných prvků měřicího zařízení. Vhodným se jeví profil typu U z materiálu se zaručenou svařitelností (například: U 80 ČSN 42 5570 – 11 373). Uspořádáním by se jednalo o rám portálového typu pro dosažení vyšší tuhosti. Hlavní výhody považuju v relativně vysoké tuhosti a malých nákladech. Nevýhodou této koncepce je menší variabilita.

3.1.2. Duralový rám

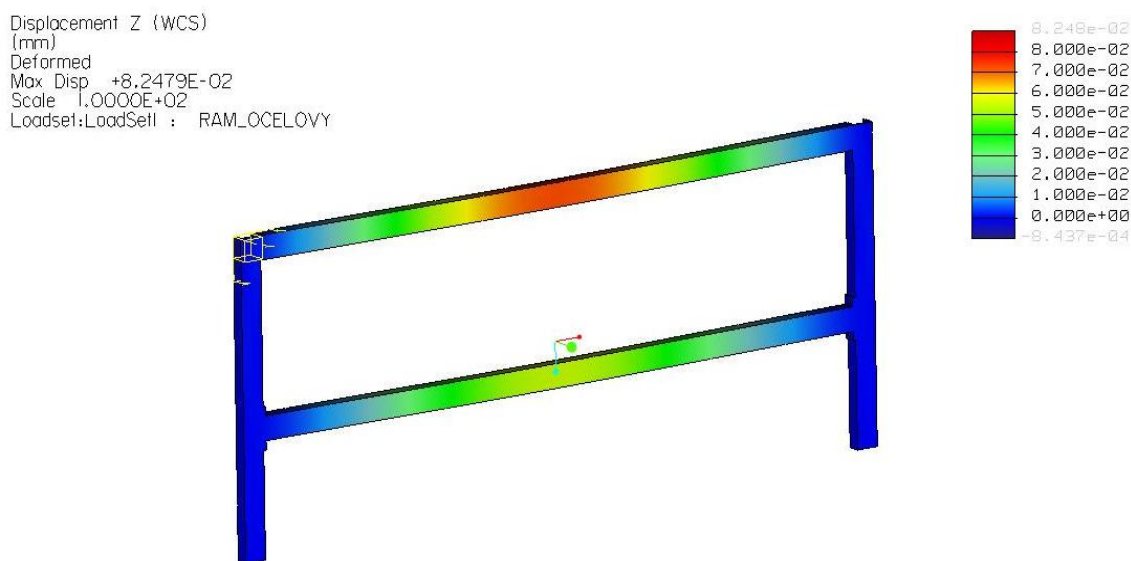
Další možností je montovaný rám z jednotlivých duralových profilů. Jednotlivé dílce by byly pospojovány pomocí úhelníků. Tento modulový systém nám poskytuje velkou flexibilitu a relativní jednoduchost montáže. Na druhou stranu duralové profily vykazují menší tuhost než ocelové a též náklady na pořízení této varianty jsou vyšší. Vhodnou variantou mohou být duralové profily 80 x 80 mm.

3.1.3. Kombinovaný rám

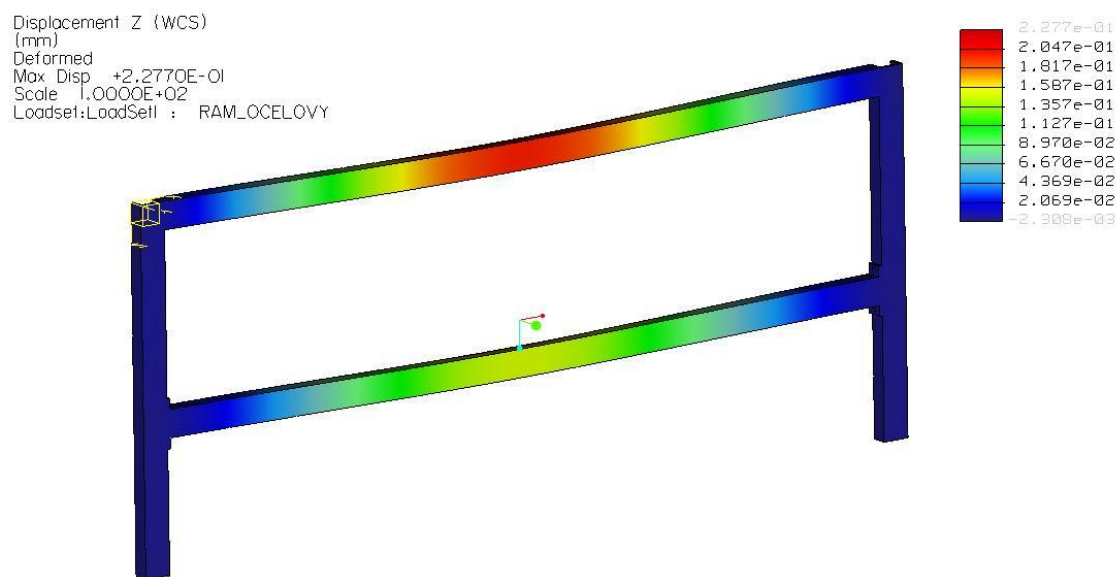
Koncepce rámu je ze dvou celků. Základním nosným prvkem by byl ocelový profil typu U, jenž by byl ukotven do základny a na něj by byly namontovány stavebnicové prvky z duralového profilu 80x80mm. Uchycení profilů provedeno pomocí úhelníků s bočnicemi pro dosažení zvýšené tuhosti. Duralové profily nám zajistí pro nás dostatečnou flexibilitu konstrukce měřícího zařízení.

3.1.4. Porovnání tuhostí rámu

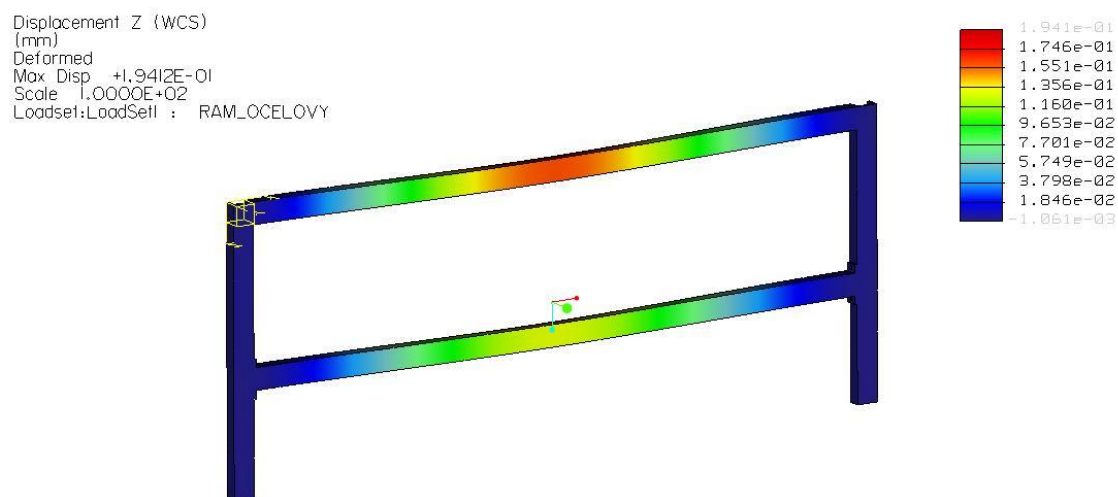
Hlavním kritériem pro výběr varianty rámu je jeho tuhost. Provedl jsem proto simulaci modelů rámu metodou konečných prvků. Sledovanou veličinou byla deformace pod jednotným zatížením, které jsem zvolil 100 N. Výsledky analýz jsou zobrazeny na obr. 29, 30 a 31. Z analýz je patrné, že nejvyšší tuhost vykazuje rám tvořený ocelovými profily. Maximální průhyb je o řád nižší než u ostatních variant.



Obr. 29: Analýza MKP ocelového rámu



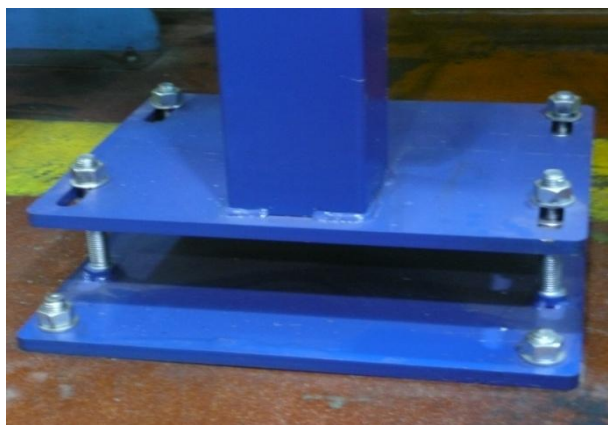
Obr. 30: Analýza MKP duralového rámu



Obr. 31: Analýza MKP kombinovaného rámu

3.1.5. Ukotvení rámu

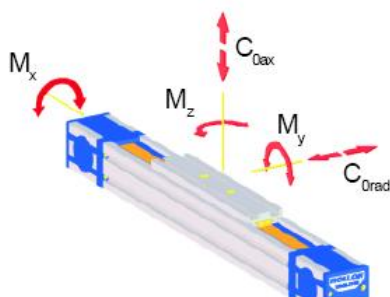
Rám je k podlaze ukotven pomocí základny sestávající ze dvou ocelových desek. Ke spodní desce, která je pevně ukotvena k podlaze, je navařena čtveřice šroubů a na nich pomocí matek uložena deska nesoucí rám měřicího zařízení. Tato vrchní deska dále obsahuje trojici průchozích závitových děr pro umístění nosných šroubů, na kterých je po dotažení vyvoláno předepnutí. Tento systém umožňuje nivelaci měřicího zařízení do roviny dopravníku. Ukotvení rámu zjednodušenou formou je znázorněno na obr. 32.



Obr. 32: Ukotvení rámu

3.2. Lineární vedení

Lineární vedení u měřicího zařízení slouží k nastavení snímacího kompletu do správné polohy napříč dopravníkem (nejčastěji na střed dopravníku) a případně k přísunu snímacího kompletu ke kraji dopravníku ze servisních důvodů. Zvoleno lineární vedení s pohybem vozíku zajištěným ozubeným řemenem (konkrétně lineární vedení od firmy Rollon, řada UNILINE A). Vzhledem k malým hmotnostem komponent snímacího kompletu zvolena varianta A40. Ověření provedeno kontrolním výpočtem statické únosnosti. Ověření se provádí porovnáním vnějších zatěžujících sil a momentů s maximálními povolenými hodnotami (viz tabulka v obr. 33). Ověření provedeno v kapitole 4.1 na základě vybraných komponent snímacího kompletu.



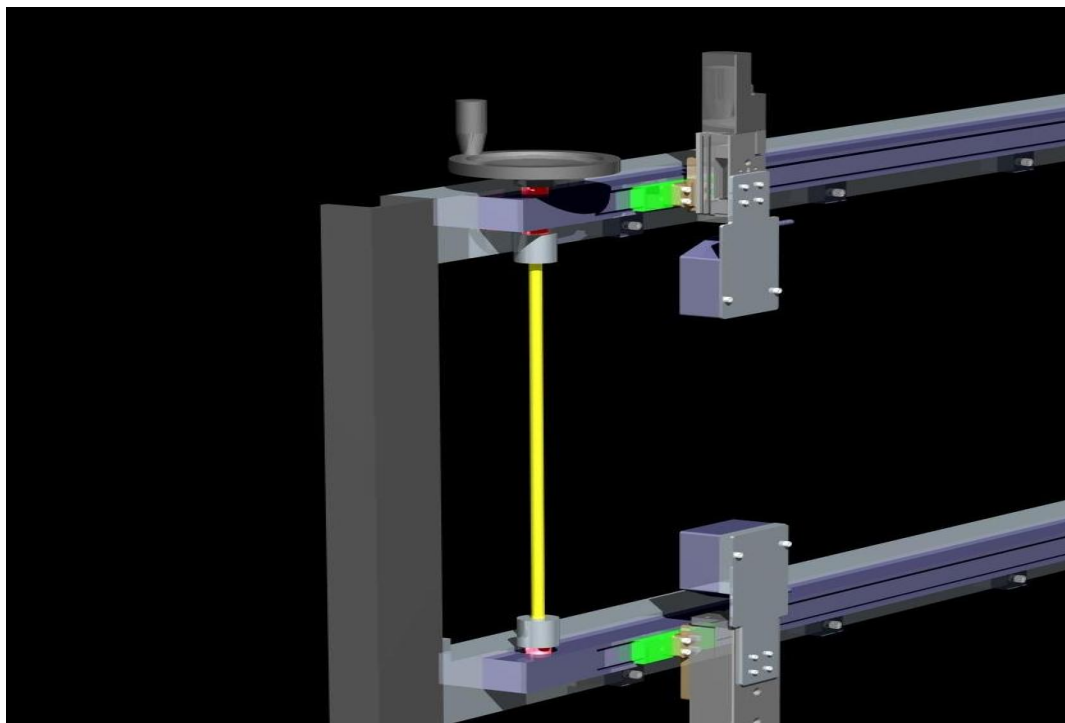
Type	C_{0rad} [N]	C_{0ax} [N]	M_x [Nm]	M_y [Nm]	M_z [Nm]
A40	820	300	2.8	5.6	13.1
A55	2175	750	11.5	21.7	54.4
A75	5500	1855	43.6	81.5	209

Obr. 33: Lineární vedení Rollon s tabulkou únosnosti [13]

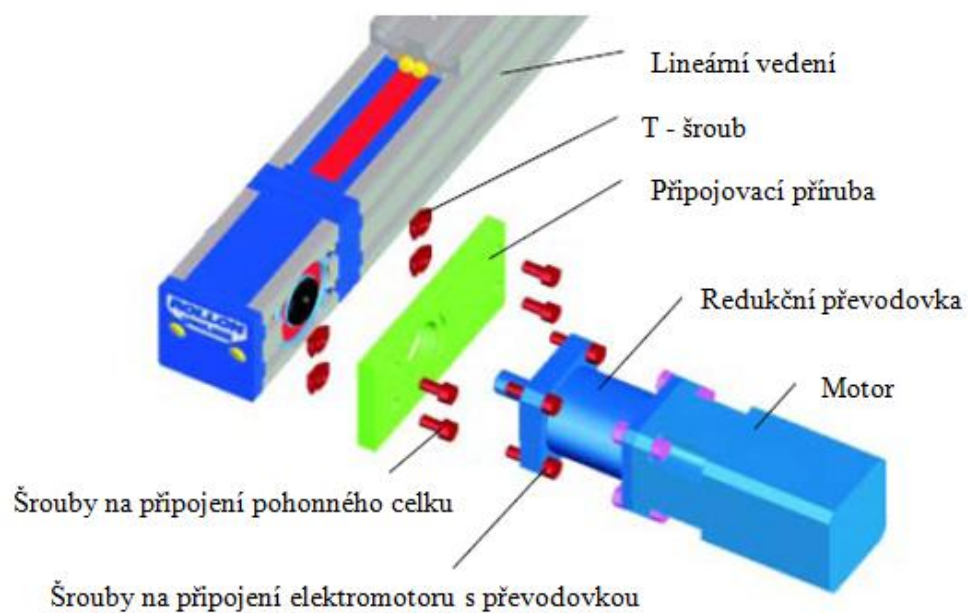
3.2.1. Pohon lineárního vedení

Jelikož není potřeba přesného a rychlého polohování může být pohon zajištěn ručně. Příčný posuv se provádí pouze při změně sortimentu (ne pokaždé), případně pro potřeby servisu. 3D vizualizace možného řešení ručně ovládaného posuvu je na obr. 34.

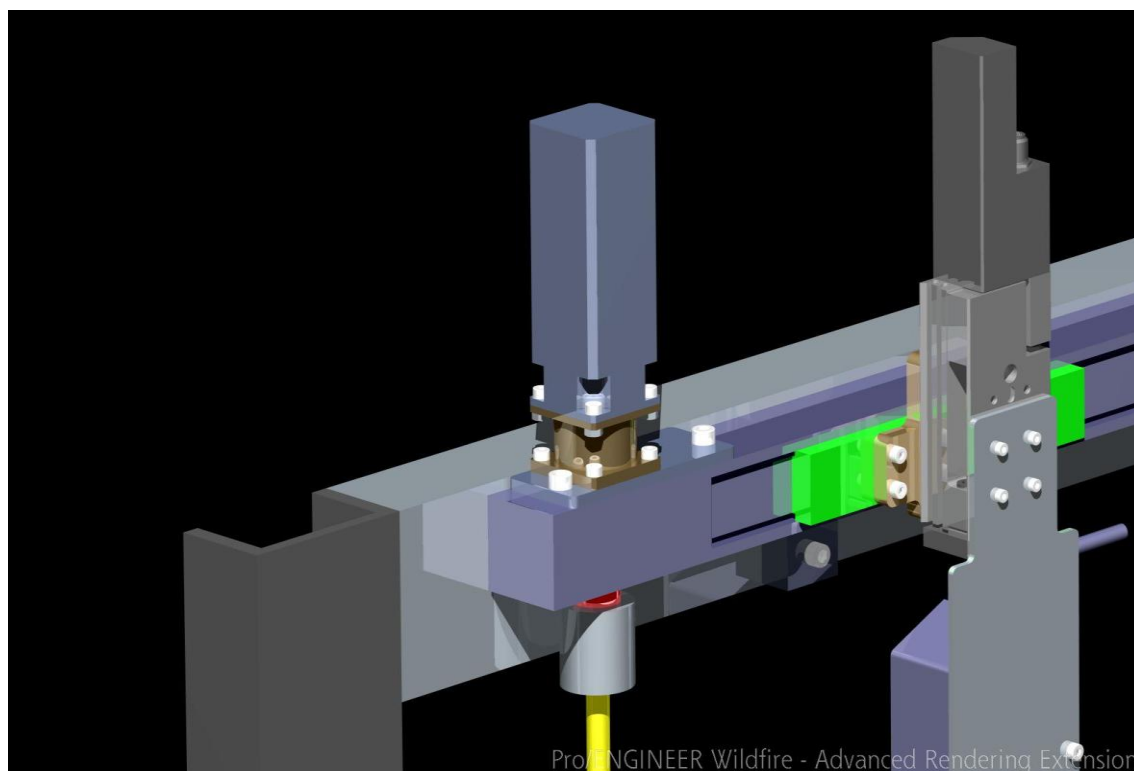
V případě, že by vznikla potřeba rychlejšího a přesnějšího posuvu může být k lineárnímu vedení připojen malý asynchronní elektromotor, např. výrobce ZIMM [2]. Schéma připojení ukázáno na obr. 35. 3D vizualizace možného řešení posuvu pomocí elektromotoru je na obr. 36.



Obr. 34: 3D vizualizace ručně ovládaného posuvu



Obr. 35: Schéma připojení elektropohonu k lineárnímu vedení



Obr. 34: 3D vizualizace pohonu posuvu pomocí elektromotoru

3.2.2. Odměřování

Z hlediska polohy napříč dopravníkem je pro nás důležité, aby se poloha snímacího kompletu nacházela nad plochou měřeného skla. Přesně stanovená poloha není z hlediska funkce měření podstatná, ale nese značné ulehčení pro obsluhu, pokud se vypracuje seznam poloh pro jednotlivé výrobky. Obsluha pak při změně sortimentu zná potřebné umístění snímacího kompletu napříč dopravníkem.

Odměřování je možno provádět pomocí nalepení magnetického pásku na tělo lineárního vedení a zavazbení jezdce snímače k vozíku lineárního vedení. Výstupem je pak naměřená vzdálenost zobrazená na LED displeji, jenž by byl umístěn na kraji rámu měřícího zařízení.

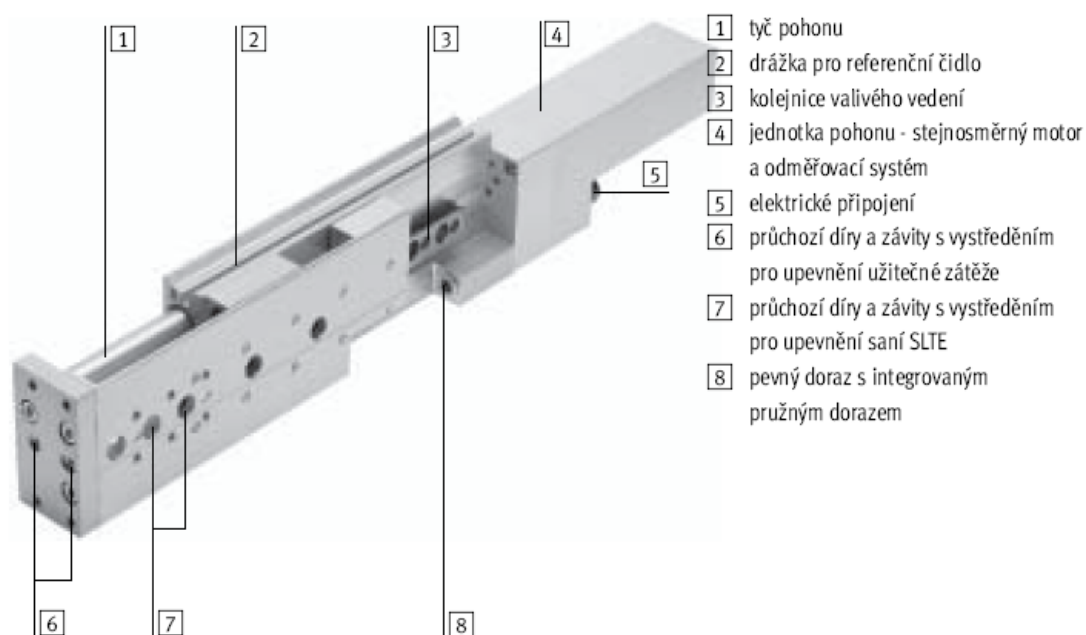
Další možností je vyznačení polohy pro konkrétní model měřeného skla přímo na konstrukci měřícího zařízení. Jedná se o méně sofistikovanou metodu, ale pro náš případ dostačující.

3.3. Lineární aktuátor

Lineární aktuátor má v rámci snímacího kompletu funkci nastavit snímač do požadované referenční vzdálenosti senzoru od plochy měřeného skla. Hlavní požadavky kladené na lineární aktuátor jsou tuhost vedení, přesnost polohování a snadná obsluha. Pro konstrukci měřícího zařízení byly vytipovány dvě pohonné jednotky. Jednou variantou jsou saně s přímočarým vedením Mini SLTE od firmy Festo a druhou kompaktní krátkozdvíhový pohone typu LXF od firmy SMC.

3.3.1. FESTO

Elektrické saně s přímočarým vedením Mini SLTE od firmy Festo jsou pohonnou jednotkou, která se vykazuje přesným a tuhým vedením, možností naprogramování libovolných poloh, krátkým časem polohování, měkkým najížděním do koncových poloh a integrovanými snímači poloh. Schéma pohonu na obr. 35.



Obr. 35: Pohon Mini SLTE, Festo [3]

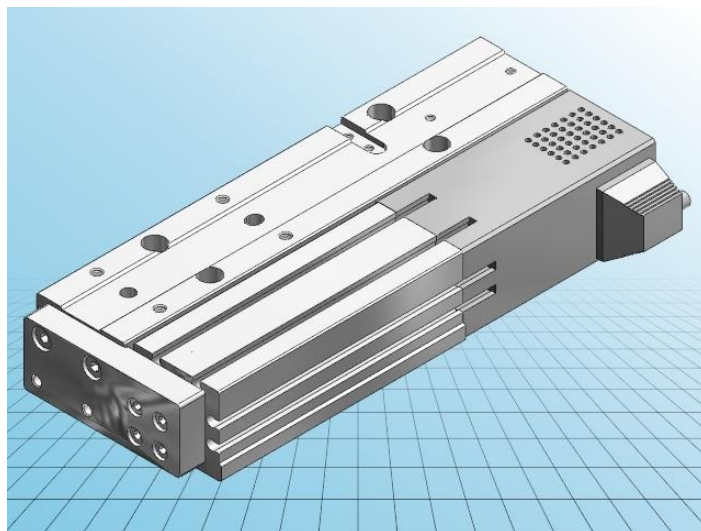
Elektromechanický pohon se dodává ve dvou velikostech dle průměru vodící tyče pohonu: 10 a 16 mm. Rozmezí zdvihů je 50, 80, 100, 150 mm. Nosnost ve svislé montážní poloze je do 2 kg. Minimální rychlost pohybu činí 2 mm/s a opakovatelná přesnost je garantována do 0,1 mm.

Společně s pohonem se dodává ovládací modul motoru SFC, který lze umístit v blízkosti pohonu díky jeho stupni krytí. Modul by byl spolu s modulem ovládání senzorů umístěn na rámu měřicího zařízení. Panel obsahuje základní ovládací prvky, dále je k němu možno připojit PC a ovládání provádět pomocí softwaru FCT (Festo Configuration Tool).

3.3.2. SMC

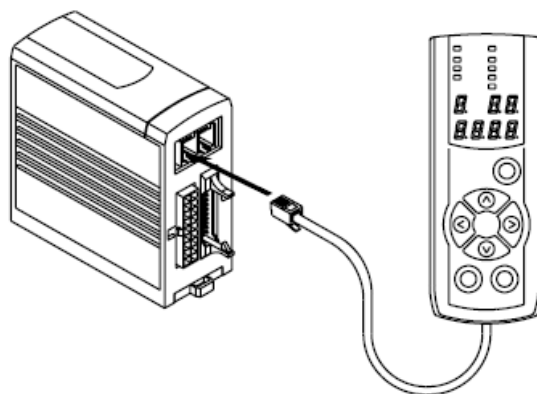
Pohonná varianta číslo 2 by byla tvořena kompaktním krátkozdvížným pohonem typu LXF od firmy SMC, 3D vizualizace pohonu zobrazena na obr. 36. Jednotka obsahuje pěti fázový krokový motor s vedením o rozměru 6 mm a kuličkový šroub průměru 8 mm.

Maximální zatížení ve svislé montážní poloze činí 2 kg pro zdvihy 50 mm i 100 mm. Maximální rychlost je až 100 mm/s a doporučená minimální rychlost, abychom se vyhnuli nežádoucím vibracím, je 6mm/s. Přesnost opakovatelnosti polohy do 0,05 mm.



Obr. 36: 3D vizualizace pohonu SMC [4]

K ovládání krokového motoru řady LX slouží ovládací panel LC. Pozice motoru ovládána pomocí pulzního signálu. Snadné základní ovládání polohy motoru lze provádět pomocí dálkového zařízení připojeného k panelu LC (viz obr. 37).



Obr. 37: Propojení panelu a dálkového ovládání [4]

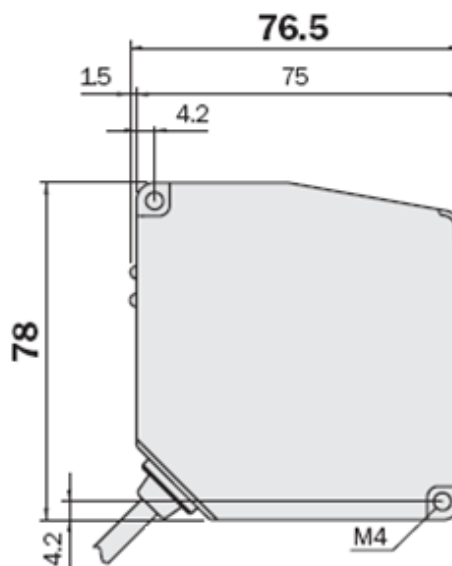
3.4. Senzory

Mezi alternativy, kterými se hodlám zabývat, jsem si vybral tři snímače. Dva triangulační, konkrétně Sick OD25-01T1 a Keyence LK-G15, jelikož byly laboratorně testovány a jeden snímač konfokální, Micro-Epsilon optoNCDT 2401. Snímače budou popsány z hlediska technických parametrů. Zabývat se budu kalibrací snímačů a formou výstupů, což spolu úzce souvisí.

3.4.1. SICK, triangulační

Zvoleny senzory firmy Sick, řada OD Max, vykazující se vysokou měřicí přesností, nezávislostí na měřeném povrchu (matný i lesklý, tmavý i světlý), schopností měřit transparentní materiál (typ OD25-01T1). Další výhodou pro tuto variantu je schopnost vyhodnocovací jednotky pracovat standardně s dvojicí vstupů (připojení dvojice senzorů, což je náš případ).

Typ OD25-01T1 má následující technickou specifikaci. Zdrojem světla je červená laserová dioda pracující s vlnovou délkou 650 nm a maximálním výkonem 390 μW (použití pro měření transparentních materiálů). Měřicí rozsah je 25 mm \pm 1 mm (dostatečné rozmezí pro případnou chybu opakovatelnosti polohy pohonu) a rozlišení 0,1 μm (minimální zaznamenanatelná změna vzdálenosti měřeného povrchu). Přesnost měření pro paralelní nastavení senzorů s měřeným povrchem skla činí $\pm 0,1$ % z plného rozsahu. Plný rozsah pro typ OD25-01T1 je 2 mm a přesnost měření pak ± 2 μm (maximální odchylka od reálné hodnoty, včetně chyby linearit výstupního signálu). Hmotnost senzoru se udává 250 g. Pro uchycení senzoru slouží dvojice závitových otvorů M4 (viz obr. 38: Schéma se základními rozměry).



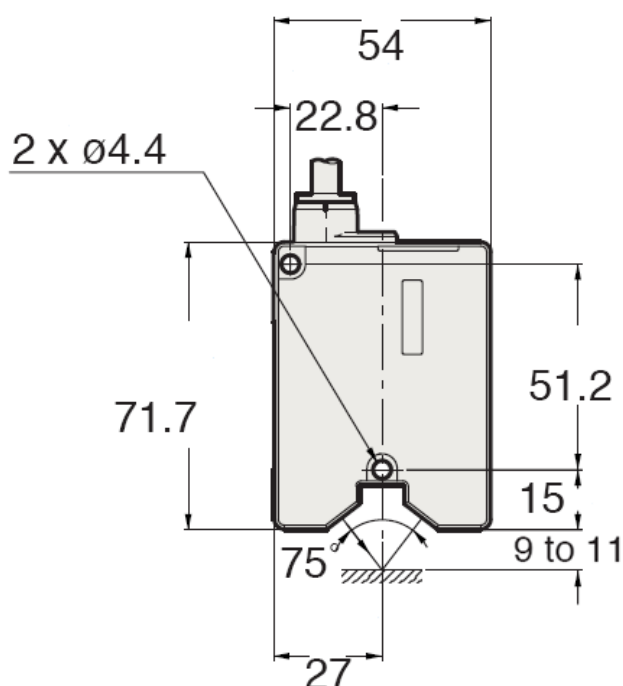
Obr. 38: Schéma senzoru se základními rozměry [5]

Zobrazovací a vyhodnocovací jednotka dodávaná k tomuto typu senzoru: AOD-G-P1 nebo AOD-G-N1 (podle toho zda použit PNP nebo NPN tranzistor). Výstupní frekvence nastavena na 10 kHz. Výstupy jednotky: dva analogové napěťové (od -5 V do +5 V), dva analogové proudové (od 4 mA do 20 mA) a dva alarmové výstupy. Vyhodnocovací jednotka obsahuje barevný LCD display pro zobrazení výsledků a také snáší vibrace v rozmezí 10 Hz až 55 Hz takže je možné její použití přímo v provozu. V našem případě by jednotka byla umístěna spolu s jednotkou ovládání pohonu na rámu měřicího zařízení.

3.4.2. KEYENCE, triangulační

Zvoleny senzory firmy Keyence, typ LK-G15. Tato řada se vyznačuje precizním a vysoce přesným měřením. Toho je dosaženo osazením senzoru speciálním Li-CCD (linearizované CCD) čipem. Klasické CCD má vždy digitální výstupní vlastnosti zvlášť pro každý jednotlivý pixel a na okrajích se objevují rušivé chyby. Linearizované CCD udává polohu světla v odráženém pixelu. To má kladný vliv na odstranění ovlivňování měření barvou, vlastnostmi povrchu nebo rušivým světlem.

Technické vlastnosti senzoru LK-G15: zdrojem světla je dioda emitující červené laserové záření (650 nm) o výkonu 0,3 mW, měřicí rozsah je $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ a rozlišení $0,02 \text{ } \mu\text{m}$ (pozn.: Vlivem zařazení tohoto zboží Japonskou vládou do strategického materiálu je složitější získat povolení na jeho export z Japonska. Toto nařízení se nevztahuje na senzor typu LK-G15H, který se liší rozlišením a jeho hodnota je



Obr. 39: Schéma senzoru se základními rozměry [6]

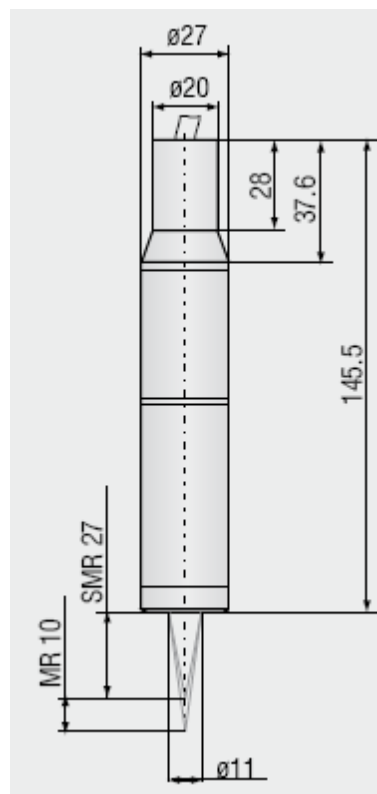
0,3 μm). Senzor snáší vibrace od 10 Hz do 55 Hz a hmotnost činí přibližně 190 g. K uchycení slouží dvě průchozí díry pro šroub M4 (viz obr. 39: Schéma se základními rozměry).

Jako kontrolní a zobrazovací jednotka navržen model LK-G3001V s NPN tranzistorem. Umožňuje současné připojení a sledování dvou senzorů. Obsahuje dva analogové napěťové výstupy s rozsahem $\pm 10\text{ V}$, dva analogové proudové výstupy s rozsahem od 4 mA do 20 mA a jeden alarmový výstup.

3.4.3. Micro-Epsilon, konfokální

Použití konfokálního senzoru od firmy Micro-Epsilon, řady optoNCDT 2401. Tento typ senzoru se je vhodný pro měření na transparentních materiálech (např. sklo). Mechanismus měření pomocí konfokálního senzoru je vysvětlen v kapitole 2.2. Pro náš případ je vyhovující senzor IFS2401-10. Základní schéma a rozměry znázorněny na obr. 40.

Technické parametry: Začátek měřicího rozsahu je 27 mm a samotný měřicí rozsah činí 10 mm. Rozlišení snímání je 0,4 μm . Senzor váží přibližně 190 g. Maximální přípustný úhel náklonu senzoru při měření je stanoven $\pm 14^\circ$. Ovládací jednotka IFC2401 dodávaná pro tento typ senzoru disponuje dvěma analogickými napěťovými výstupy v rozmezí 0 V – 10 V. Senzor je připevněn pomocí montážního bloku a prstence MA2400.



Obr. 40: Schéma senzoru IFS2401-10 [7]

3.4.4. Kalibrace

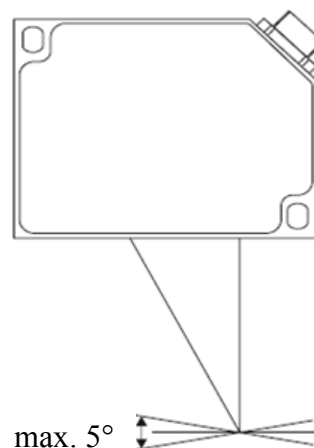
Pro systém kalibrace bude nutno vytvořit soubor etalonů. Etalonem bude vždy přesně proměřený (například precizním ručním přeměřením pomocí mikrometru) vzorek skla. V souboru vzorků budou obsažena všechna skla, která se na přípravných linkách opracovávají.

Snímací komplet se nastaví do požadované měřicí polohy a na výrobní linku se do místa, kterým bude projíždět proměřované sklo, položí odpovídající etalon. Etalon je statický (linka se nepohybuje) a snímače se pomocí lineárních aktuátorů nastaví do referenční polohy (přisun do doby, než vyhodnocovací jednotka senzorů zahlásí, že jsou senzory ve správné poloze). Na vyhodnocovací jednotce se nastaví krajní hodnoty analogového výstupu (nejčastěji napěťový) tak, aby hlášená hodnota tloušťky skla odpovídala skutečné hodnotě etalonu.

S kalibrací úzce souvisí přesnost uložení senzorů. Dle výrobců úhel odchylky měřené plochy od ideální paralelní polohy je maximálně 5° , aby nedocházelo ke zkreslení výsledku měření (viz obr. 41). Tato odchylka se nejvíce projeví při nivelaci měřicího zařízení do roviny dopravníku přípravné výrobní linky. Při šířce rámu 2400 mm a uložení senzorů uprostřed je spočtená odchylka na každé straně uložení přibližně 55mm což z hlediska přesnosti montáže je více než dostatečná hodnota a dává nám to dostatečnou toleranci pro nivelaci měřicího zařízení do roviny dopravníku.

Další odchylka od rovnoběžnosti měřicího zařízení a plochy měřeného skla může nastat při příčném přenastavení snímacího kompletu do jiné měřicí polohy.

Tato možnost je ovšem ošetřena tím, že při přenastavování měřicí polohy musí dojít k zasunutí pohonu snímacího kompletu, aby při příčném posuvu nedošlo ke kolizi s konstrukcí dopravníku. Po dosažení nové měřicí polohy dojde k opětovnému nastavení senzorů SK do referenční vzdálenosti.



Obr. 41: Odchylka paralelní polohy

4. Výběr a konstrukční popis

V následující kapitole bude proveden výběr z alternativ jednotlivých konstrukčních prvků. Nejdříve budou porovnány senzory. K vybraným snímačům se zvolí lineární aktuátory. Dále se budu zabývat lineárním vedením a nakonec bude zvolen rám měřicího zařízení. Po zvolení jednotlivých prvků bude proveden popis konstrukce doplněný o potřebné výpočty.

4.1. Výběr prvků

Senzory budou posuzovány z hlediska rozsahu, rozlišení, linearity, vlivu okrajových podmínek, komunikace a nákladů. Přehled viz tabulka 1. Konfokální senzory jsem se rozhodl vyřadit hned na začátek z hlediska jejich vysoké pořizovací ceny (řádově sta tisíce oproti řádově deseti tisícům za snímače triangulační).

	SICK	KEYENCE
rozsah	±1 mm	±1 mm
linearita	± 0,1%	± 0,03 %
rozlišení	0,1 μm	0,02 μm
komunikace	+	++
vliv okrajových podmínek	+	++
náklady	++	+

Tabulka 1: Porovnání senzorů

Testovací analýza (kapitola 2.4) prokázala, že jak snímač firmy Sick OD-25-01T1, tak i senzor firmy Keyence LK-G15 je vhodnou alternativou pro kontinuální měření tloušťky plochého skla. Zmíněné systémy nevykazují výraznou závislost na změnách okrajových podmínek měření a jeví se tedy jako prakticky využitelné pro nasazení ve výrobní lince. Na základě porovnání vyplývá, že lze preferovat snímače Keyence, u kterých je navíc výstupní signál mnohem méně ovlivněn nežádoucími šumy. Vyšší náklady, přibližně 50 000 Kč za senzor Keyence oproti 30 000 za senzor Sick, považuji za přijatelné.

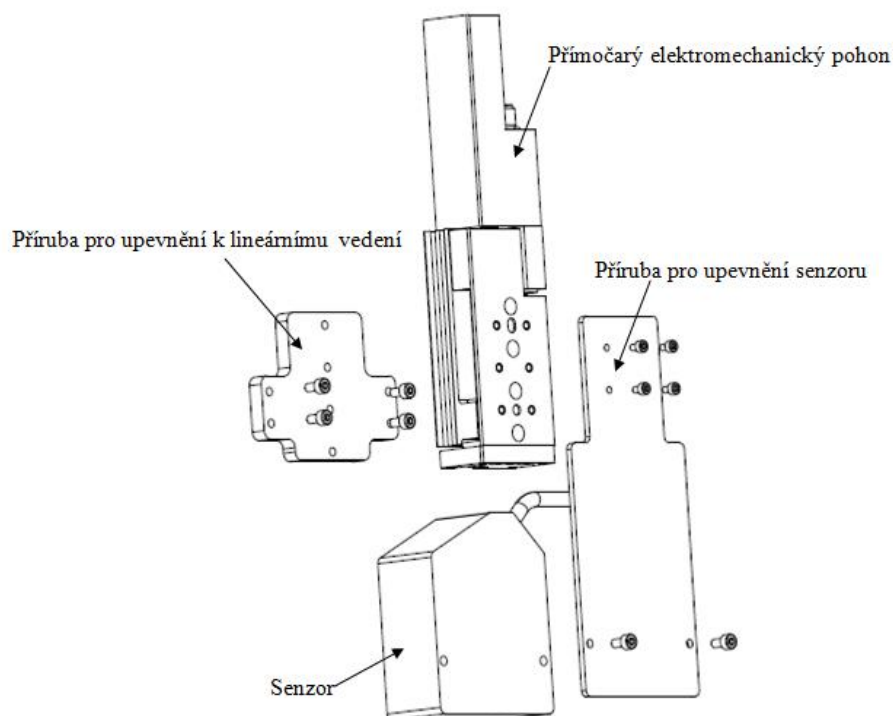
Elektromechanické pohony byly posuzovány z hlediska tuhosti vedení, plynulosti polohování, přesnosti polohování, snadnosti ovládání, komunikace (možnosti napojení na průmyslový počítač a provázání s řízením ovládací linky) a nákladů. Porovnání viz tabulka 2. Na základě porovnání jsem se rozhodl zvolit pohon od firmy Festo.

	FESTO	SMC
tuhost vedení	++	+
plynulost polohování	++	+
přesnost polohování	+	++
komunikace	++	+
jednoduchost ovládání	++	+
náklady	+	++

Tabulka 2: Porovnání pohonů

4.2. Popis konstrukce a výpočty

Elektromechanický pohon spolu se senzorem a soustavou přípojných podložek tvoří snímací komplet. Měřicí zařízení pracuje s laser-optickými triangulačními senzory. K měření je potřeba dvojice snímačů a proto konstrukce obsahuje dva snímací komplety. Horní umístěný nad měřeným sklem a dolní umístěný pod úrovní měřeného skla. Schéma snímacího kompletu s jednotlivými prvky je znázorněn na obr. 42.



Obr. 42: Schéma snímacího kompletu

Pro horní snímací komplet volím motor s pístem průměru 16 mm a zdvihem 50 mm. Pro svislou montážní polohu má motor nosnost až 2 kg, což pro komplet senzoru a příruby vážící přibližně 0,5 kg představuje dostatečnou rezervu. Hmotnost pohonu činí 574 g (důležité pro výpočet únosnosti lineárního vedení).

Pro spodní snímací komplet volím motor s průměrem pístu 16 mm a zdvihem 100 mm. Větší zdvih zvolen k zamezení možné kolize zasunutého snímacího kompletu s konstrukcí dopravníku při příčném posuvu. Spodní snímací komplet proto musí být umístěn dostatečně nízko, ve větší vzdálenosti od měřeného povrchu, proto zvolen větší zdvih. Nosnost je stejná, do 2 kg. Hmotnost pohonu je 1714 g.

Lineární vedení zvoleno s pohybem vozíku zajištěným ozubeným řemenem (konkrétně lineární vedení od firmy Rollon, řada UNILINE A viz obr. 33). Pro pohon lineárního vedení zvolen ruční pohon a k odměřování polohy shledávám dostačující značení míst na konstrukci měřícího zařízení (viz kapitola 3.2.1 a 3.2.2). Vzhledem k malým hmotnostem komponent snímacího kompletu zvolena varianta A40. Ověření provedeno kontrolním výpočtem statické únosnosti. Ověření se provádí porovnáním vnějších zatěžujících sil a momentů s maximálními povolenými hodnotami (viz tabulka v obr. 33).

Rovnice pro ověření:

$$\frac{P_r}{C_{0rad}} + \frac{P_a}{C_{0ax}} + \frac{M_1}{M_x} + \frac{M_2}{M_y} + \frac{M_3}{M_z} \leq \frac{1}{z} \quad (1)$$

Bezpečnostní faktor z volím dle tabulky 3 rovno 1,5.

z	
žádné vibrace, jemné a méně časté reverze pohybu, vysoká montážní přesnost	1 - 1,5
normální sestavné podmínky	1,5 - 2
vibrace, vysoká frekvence reverzních pohybů	2 - 3,5

Tabulka 3: Tabulka volby bezp. faktoru z [13]

Stanovení zatěžujících sil a momentů:

P_r ve směru radiálním od hmotnosti snímacího kompletu viz rovnice (2).

$$P_r = m_{SK} \cdot g \quad (2)$$

$$m_{SK} = 2,6 \text{ kg}$$

$$P_r = 25,5 \text{ N}$$

Momentové zatížení M_1 vyvolané hmotností snímacího kompletu ve směru M_x z rovnice (3).

$$M_1 = P_r \cdot r_{M1} \quad (3)$$

r_{M1} stanoveno z rozměrů snímacího kompletu na 25,6 mm

$$M_1 = 0,653 \text{ Nm}$$

Dosazením do rovnice (1) získám poměr: $0,28 \leq 0,67$.

Lineární vedení z hlediska statické únosnosti vyhovuje.

Výpočet životnosti lineárního vedení:

Životnost v kilometrech je dána rovnicí (4):

$$L_{km} = 100 \cdot \left(\frac{C}{P} \cdot \frac{f_c}{f_i} \cdot f_h \right)^3 \quad (4)$$

Hodnota dynamické zátěže C je stanovena pro danou modelovou řadu (viz tabulka 4).

Families	A		
Type	A40	A55	A75
C [N]	1530	4260	12280

Tabulka 4: Tabulka dynamické zátěže C [13]

Síla P se stanoví z rovnice (5):

$$P = P_r + \left(\frac{P_a}{C_{0ax}} + \frac{M_1}{M_x} + \frac{M_2}{M_y} + \frac{M_3}{M_z} \right) \cdot C_{0rad} \quad (5)$$

$$P = 231 \text{ N}$$

Servisní faktor f_i zvolen dle tabulky 5 rovno 1,5

f_i	
žádné vibrace, jemné a méně časté reverze pohybu, čisté pracovní prostředí, malé rychlosti (do 1m/s)	1 - 1,5
lehké vibrace, střední rychlosti (do 2,5m/s), středně časté reverze pohybu	1,5 - 2
vibrace, vysoké rychlosti (nad 2,5m/s), vysoká frekvence reverzních pohybů, velmi znečištěné pracovní prostředí	2 - 3,5

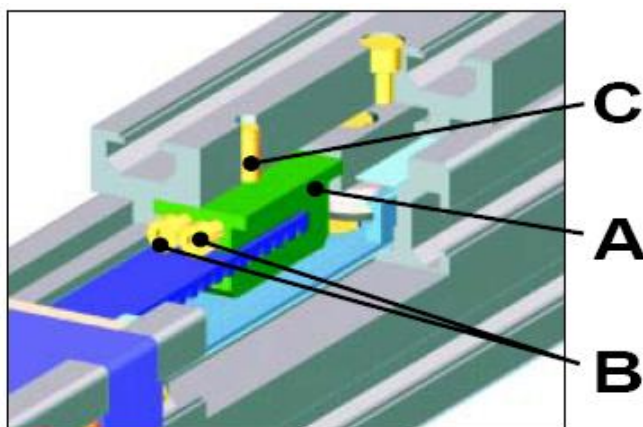
Tabulka 5: Tabulka volby servisního faktoru f_i [13]

Faktor f_h závisí na zdvihu (pracovní oblast lineárního vedení). Zdvih má hodnotu 1400mm. Pro zdvih větší jak 1m je faktor f_h roven 1. Faktor f_c dán výrobcem rovno 1.

Dosazením do rovnice (4) zjištěna životnost lineárního vedení přibližně 8600km.

Výpočet napínací síly řemene lineárního vedení:

Potřebná napínací síla pro daný typ vedení je stanovena výrobcem na 160 N. Nastavení napínací síly se provádí pomocí napínacího šroubu (viz obr. 43). Potřebný počet otáček napínacího šroubu je závislý na délce ozubeného řemene, závislost je zobrazena na grafu v obr. 44. Pro sílu 160 N odpovídá přibližně 1,3 otáčky šroubu na metr délky řemene.

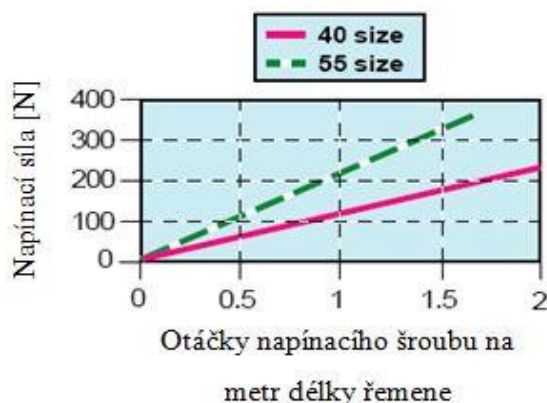


A - Napínací zařízení

B - Napínací šroub

C - Pojistný šroub

Obr. 43: Řez napínacím systémem [13]



Obr. 44: Stanovení otáček napínacího šroubu [13]

Stanovení délky ozubeného řemene:

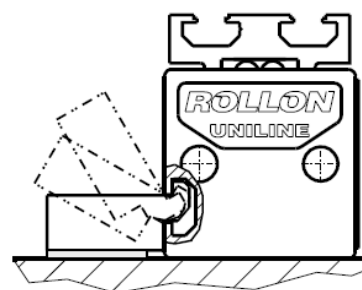
$$L_{rem} = 2 \cdot zdvih_{lin.ved} + 0,515 \quad (6)$$

Zdvih lineárního vedení dosazujeme do rovnice (6) v metrech a v našem případě činí 1,4 m.

$$L_{rem} = 3,315 \text{ m}$$

Na jeden metr délky potřebujeme 1,3 otáčky, celkově na 3,315 metru potřebujeme přibližně 4,3 otáčky napínacího šroubu.

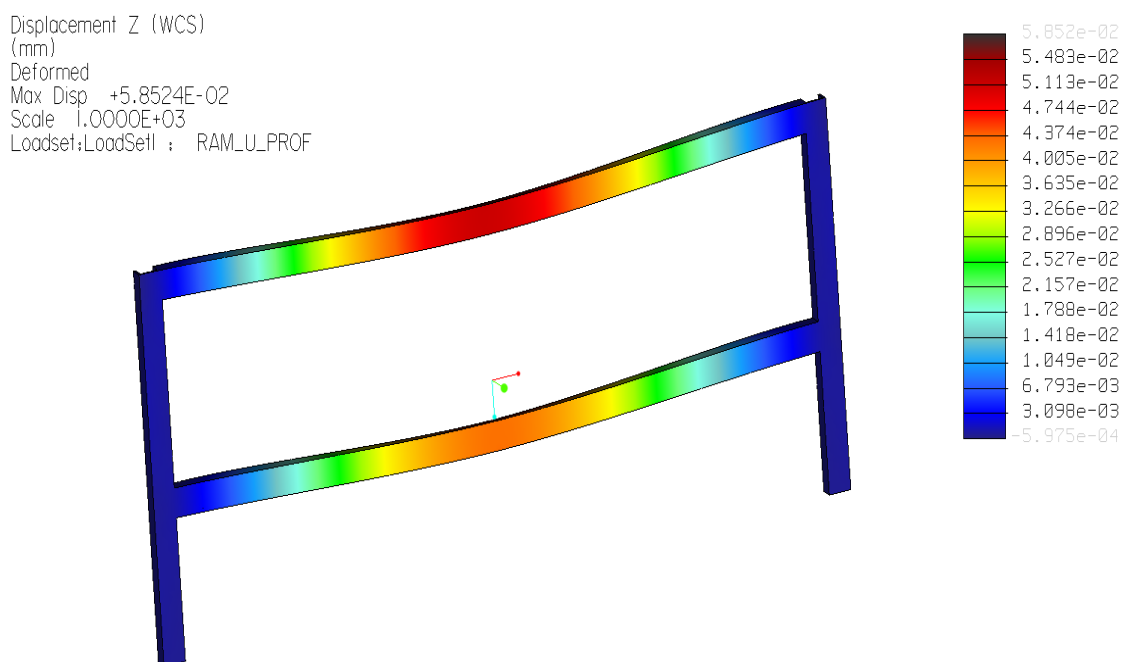
Uchycení lineárního vedení na plochu rámu se provádí pomocí několika montážních bloků, které se nasadí do profilového boku těla lineárního vedení a šroubovým spojem připevní k profilu rámu měřicího zařízení. Schéma uchycení ukázáno na obr. 45.



Obr. 45: Schéma uchycení lin. vedení [13]

Spojení mezi horním a dolním lineárním vedením je zajištěno pomocí hřídele, která je připojena k jednotlivým lineárním jednotkám přes hřídelovou spojku (zvolena plastová hřídelová spojka TX1 od firmy R+W). Spojka slouží k vymezení problémů s případnou nesouosostí výstupní hřídele z lineárního vedení a hřídele k propojení lineárních vedení.

Rámem měřicího zařízení zvolen svařenec otevřených ocelových profilů a to na základě porovnání tuhosti v kapitole 3.1.4. Pro konstrukční řešení vzhledem k potřebným rozměrům pro uchycení lineárního vedení zvolen profil průřezu U 80, z materiálu se zaručenou svařitelností (U 80 ČSN 42 5570 – 11 373). Za využití metody konečných prvků byla provedena analýza tuhosti rámu vůči tíhovému zatížení (od vlastní hmotnosti rámu a hmotnosti lineárních vedení se snímacími komplety). Výsledek analýzy je znázorněn na obr. 46. Maximální průhyb rámu byl vypočten na 0,0585 mm.



Obr. 46: Výsledek analýzy metody konečných prvků

K rámu v místech připojení lineárního vedení a spodního ramene byly navařeny podložky s obrobeným povrchem na menší drsnost. Byly provedeny kontrolní výpočty únosnosti svarových spojů. Pevnostní hodnocení koutových svarů je velmi komplikovanou záležitostí a k jejímu řešení dosud není v odborné literatuře jednotný přístup [12]. Podstata problému spočívá v obecné poloze nosného průřezu svaru vzhledem k zatížení, takže není možno přímo využívat pro výpočet napětí vztahů odvozených v pružnosti a pevnosti. Rozhodující vliv na pevnost koutového svaru má smykové napětí τ v jeho nosném průřezu. Smykové napětí vyvolané silou T vypočítáme ze vzorce (7),

$$\tau = \frac{T}{S} = \frac{T}{2 \cdot a \cdot l} \quad (7)$$

kde S značí nosný průřez svaru, a značí výšku nosného průřezu a l je délka svaru zkrácená o nekvalitu začátku a konce svaru (zkrácen o $2a$ v našem případě oboustranného koutového svaru).

Pro jednoduché statické zatížení se pevnostní kontrola provede na základě vztahů (8), pro zatížení kolmé na směr svaru a (9), pro zatížení ve směru svaru.

$$\tau_{\perp} \leq \alpha_{\perp} \frac{R_e}{k_p} \quad (8)$$

$$\tau_{\parallel} \leq \alpha_{\parallel} \frac{R_e}{k_p} \quad (9)$$

Kde α značí převodní součinitel koutového svaru pro příslušný směr napětí a zohledňuje druh provedení svaru a jeho namáhání (viz tabulka 7), kde R_e je mez kluzu v tahu materiálu spojovaných součástí a k_p požadovaná bezpečnost svaru.

Druh namáhání	Převodní součinitel α
čelní α_{\perp}	0,75 – 1,0
boční α_{\parallel}	0,65 – 0,9

Tabulka 7: Převodní součinitel koutového svaru

Materiál volím 11 373 s mezí kluzu v tahu $R_e = 250 \text{ MPa}$ a bezpečnost svaru $k_p = 3$.

Pevnostní kontrola svarů mezi podložkou pro uchycení lineárního vedení a U-profilu:

Zatěžující síla T stanovena z hmotnosti navažené podložky, lineárního vedení a snímacího kompletu: $T = 130 \text{ N}$. Velikost svaru $a = 3 \text{ mm}$ a délka čistého svaru $l = 69 \text{ mm}$. Dosazením do rovnice (7) získám hodnotu smykového napětí:

$$\tau_{\parallel} = 0,315 \text{ MPa}$$

Provedu porovnání dle vztahu (9):

$$0,315 \text{ MPa} \leq 67 \text{ MPa}. \quad (10)$$

Pevnostní kontrola svarů mezi podložkou pro upevnění spodního ramene k bočnímu U-profilu:

Zatěžující síla T stanovena z hmotnosti navažené podložky a spodního ramene: $T = 175 \text{ N}$. Velikost svaru $a = 3 \text{ mm}$ a délka čistého svaru $l = 74 \text{ mm}$. Dosazením do rovnice (7) získám hodnotu smykového napětí:

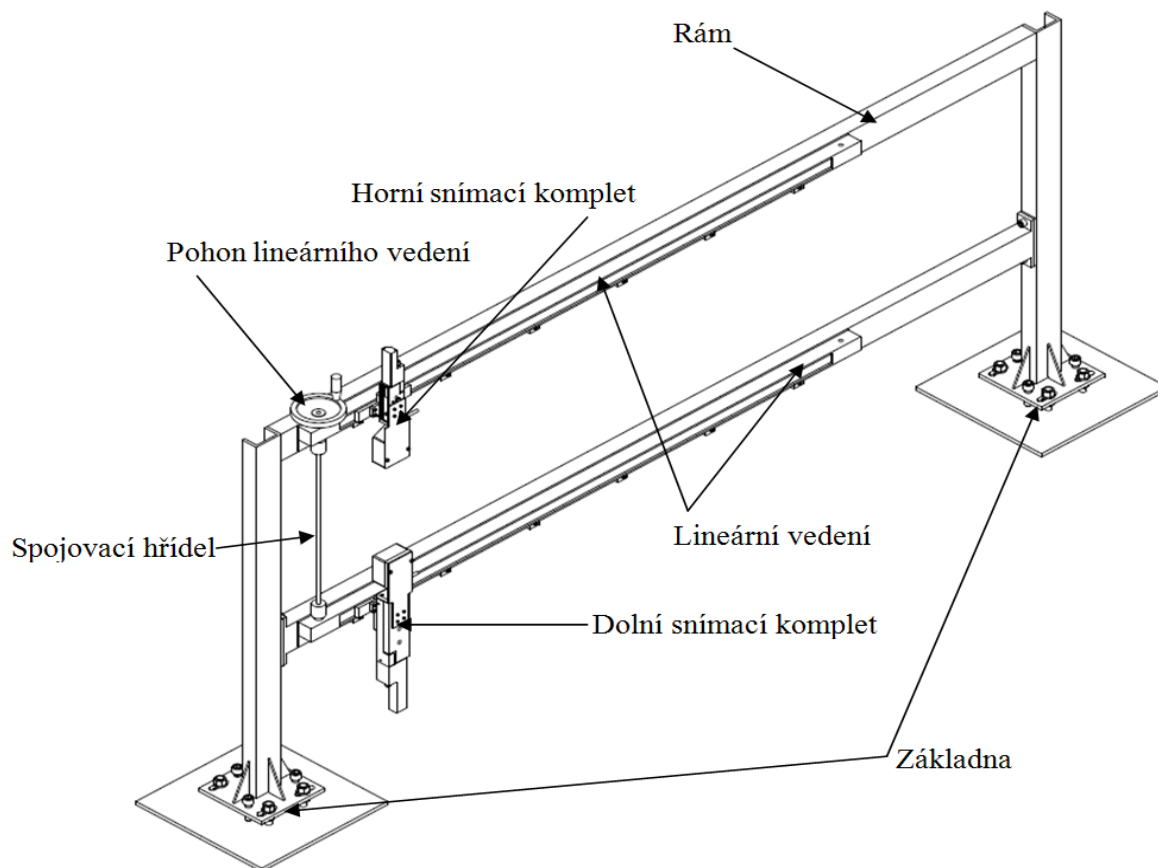
$$\tau_{\perp} = 0,4 \text{ MPa}$$

Provedu porovnání dle vztahu (8):

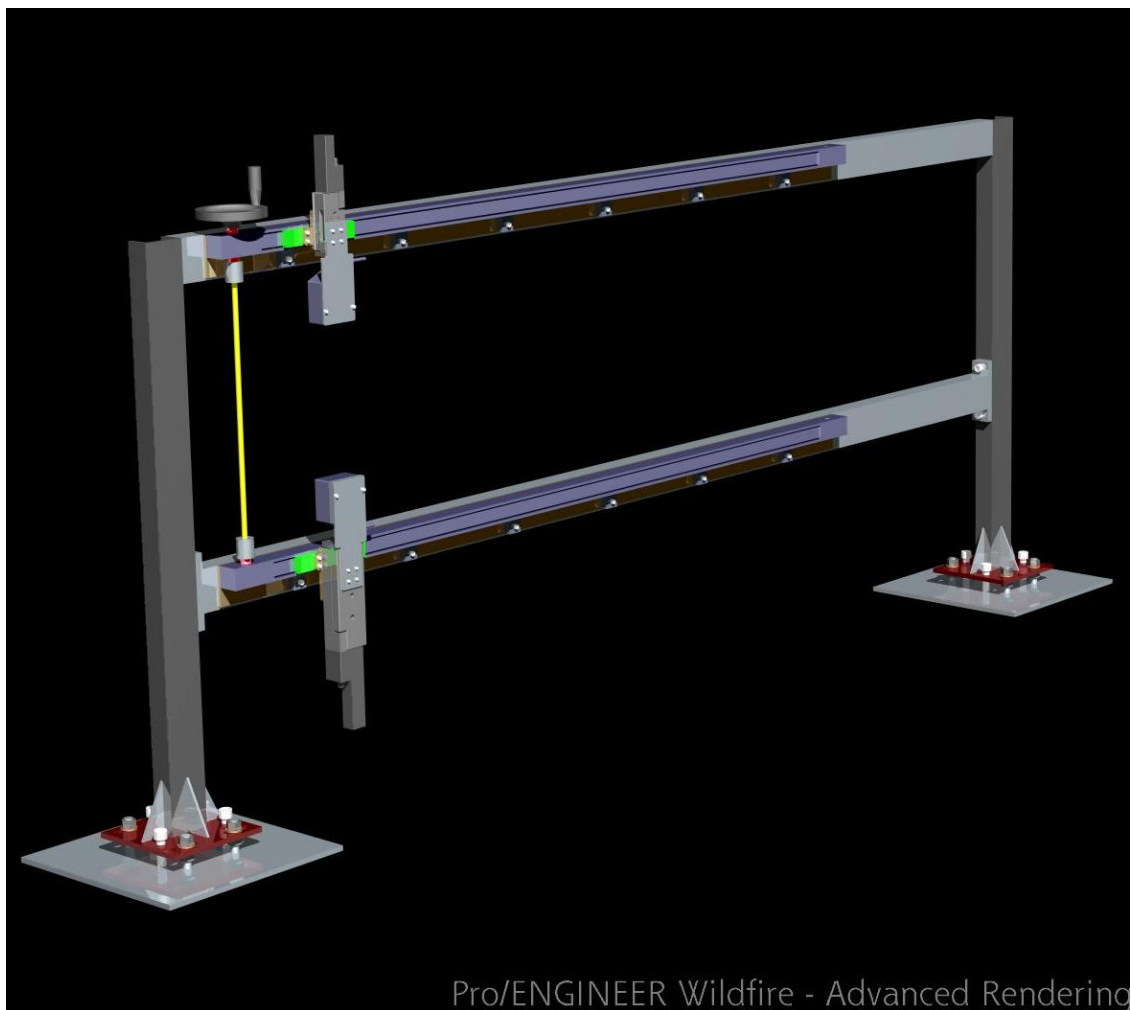
$$0,4 \text{ MPa} \leq 70 \text{ MPa.} \quad (11)$$

Z hlediska únosnosti svary dle splněných nerovností (10) a (11) vyhovují.

Schéma měřicího zařízení na obr. 47 a 3D vizualizace měřicího zařízení na obr. 48.



Obr. 47: Schéma měřicího zařízení



Obr. 48: 3D vizualizace měřicího zařízení

4.3. Přehled výkresové dokumentace

Výkres sestavy měřicího zařízení:	1-DP S04000198-1-0-00
Výkres podsestavy snímacího kompletu:	3-DP S04000198-1-9-00
Výkres rámu-svařenec:	1-DP S04000198-1-2-00

5. Zhodnocení navrženého řešení

Navržené řešení zařízení pro bezkontaktní měření tloušťky skla je schopno za podmínek provozu na přípravných výrobních linkách provádět on-line kontinuální měření tloušťky skla.

Zařízení bylo navrženo na základě technických podmínek pro zabudování do jednotlivých linek Bystronic a na základě výsledků testů laser-optických snímačů. Velký důraz byl kladen na jednoduchost obsluhy měřicího zařízení.

Měřicí zařízení pracuje s dvojicí triangulačních senzorů Sick, jenž při testování prokázaly, že jsou vhodnou alternativou pro dané on-line měření. Byl stanoven systém kalibrace a vyhodnocování pro dané řešení.

Navržený rám zařízení byl vybrán s ohledem na maximální tuhost a to bylo ověřeno pomocí analýzy metodou konečných prvků.

První etapa nasazení měřicího zařízení počítá s instalací do předem definované pozice a zahájení zkušebního provozu. To znamená, že zařízení nebude napojeno na řídicí systém linky a bude pouze pomocí světelné a zvukové signalizace předávat operátorovi linky informaci o tloušťce přířezu. Sklo není potřeba žádným způsobem značit, jestliže bude sklo vyhodnoceno jako nevyhovující, bude linka v tomto místě zastavena, špatné sklo odebere operátor z linky a provede opětovné spuštění výroby.

Ve druhé etapě po odladění, popřípadě modifikacích, se počítá se zapojením zařízení do řídicího systému linky. Zařízení bude předávat výrobní lince signál, zda je sklo OK nebo NOK. Jestliže bude sklo nevyhovující, linka bude v tomto místě zastavena a bude spuštěná světelná a zvuková signalizace.

Závěr

Diplomová práce předkládá konstrukční řešení varianty zařízení pro bezkontaktní měření tloušťky skla.

V úvodní části byl proveden rozbor současného stavu s důkladným popisem jednotlivých přípravných výrobních linek a stanoveny technické podmínky pro zabudování měřicího zařízení.

Dále byly rozebrány možnosti měření tloušťky transparentních materiálů a na základě laboratorních testů stanoveny podmínky na použitou sensoriku.

Následně byly navrženy alternativy prvků použitých na měřicím zařízení s popisem jejich vlastností a charakteristik mající vliv na kvalitu měření.

Z možných alternativ byly posléze vybrány nejvhodnější prvky a proveden konstrukční návrh měřicího zařízení a stanoveny základní etapy nasazení navrženého zařízení.

Předložená koncepce zařízení pro bezkontaktní měření tloušťky skla je určena do provozu AGC Automotive Czech, a.s., výrobní závod Chudeřice.

Seznam použité literatury

- [1] www.micro-epsilon.cz
- [2] www.zimm.at
- [3] www.festo.com
- [4] www.smc.cz
- [5] Katalogové listy výrobce senzoriky SICK
- [6] Katalogové listy výrobce senzoriky KEYENCE
- [7] Katalogové listy výrobce senzoriky Micro-Epsilon
- [8] Novotný, F. – Horák, M.: Testování laserových snímačů LK-G15 firmy Keyence, TU v Liberci, 2008, 8 s.
- [9] Novotný, F. – Horák, M.: Testování laserových snímačů OD-25-01T1 firmy Sick, TU v Liberci, 2008, 9 s.
- [10] Firemní podklady a. s. AGC Automotive Czech
- [11] Pustka, Z.: Základy konstruování (Tvorba technické dokumentace), TU v Liberci, 2004
- [12] Pešík, L.: Části strojů 1. díl, TU v Liberci, 2005
- [13] Katalogové listy výrobce Rollon